

ABC ルールの導入による  
スピーチプライバシーの評価

関西大学 環境都市工学部 建築学科  
建築環境工学第1研究室

建 20-0035 久保 和真  
指導教員 豊田 政弘

## 目次

<b>1</b>	<b>はじめに</b> .....	<b>1</b>
1.1	研究背景.....	1
1.2	既往研究.....	2
1.3	研究目的.....	3
<b>2</b>	<b>研究内容</b> .....	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>研究手法</b> .....	<b>5</b>
3.1	波動音響理論.....	5
3.2	幾何音響理論.....	7
3.3	ハイブリッド音場解析.....	10
3.3.1	計算手順.....	10
3.3.2	対象空間.....	12
3.4	サウンドマスキング音.....	13
3.5	作成音源の種類.....	13
3.6	評価方法.....	14
<b>4</b>	<b>研究結果</b> .....	<b>16</b>
4.1	回答結果.....	16
4.2	Absorption（吸音）による評価結果.....	19
4.2	Block（遮蔽）による評価結果.....	24
4.3	Cover up（サウンドマスキング）による評価結果.....	25
4.4	ABCを掛け合わせた評価結果.....	28
<b>5</b>	<b>おわりに</b> .....	<b>30</b>
	<b>参考文献</b> .....	<b>31</b>

# 1 はじめに

## 1.1 研究背景

会話にもプライバシーが存在し、その会話に含まれる情報が第三者に漏れてしまうことを防ぐためにスピーチプライバシーの確保が必要となる。例えば、銀行での金銭のやり取りの場合や、病院内で病気の説明する場合などの極秘事項や個人の情報が会話に含まれる場合、企業のオフィスにおける会議が行われる場合などには一般的な会話に比べ、よりスピーチプライバシーを確保する必要がある。

スピーチプライバシー確保のための基本的対策として ABC ルール、すなわち、吸音 (Absorption)、遮蔽 (Block)、マスキング (Cover up) の三つが挙げられる。吸音とは天井や壁などに吸音材を設置することで音のエネルギーを吸収することである。次に、遮蔽とは会話内容が周りに伝わらないように間に遮蔽板を設置することで音エネルギーを遮蔽板に当てて反射させることである。最後に、マスキングとはマスキング音をスピーカーから鳴らすことで会話を掻き消すことである。これら ABC ルールの概要を Fig. 1.1 に示す。

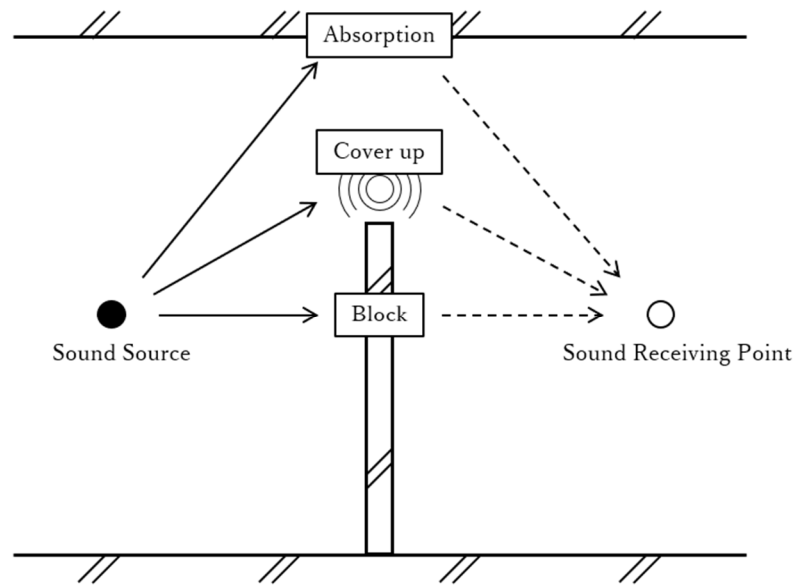


Fig.1.1 ABC rule

## 1.2 既往研究

スピーチプライバシーについては薬局や診察室を対象にしたもの<sup>1)2)3)</sup>や、オフィスにおけるサウンドマスキングによる効果<sup>4)</sup>についての研究例などがある。また、池上ら<sup>5)</sup>は遮蔽とマスキングの併用により、小さいマスキング音でのスピーチプライバシーの有効性を示している。しかし、これらの研究では ABC ルールのうち室条件に対して能動的に設置・導入を行える遮蔽 (Block) やマスキング (Cover up) についての効果について研究が行われていることが多い。佐藤ら<sup>6)</sup>の調査では、こうした対策方法を併用することによる適切な音環境とスピーチプライバシー効果を持った状況の実現の必要性が示されている。

### 1.3 研究目的

スピーチプライバシーは、室内環境を区切って到達音を遮断することやサウンドマスキングで使用する音源の音量を十分に大きくするなどして確保することができるが、これらの方法には室条件が限られたり、大きすぎるマスキング音を聴くことにより不快感を感じてしまうなどの欠点がある。また、既往研究では吸音（Absorption）は前提条件として扱われることが主であり、ABC ルールの全体に対する評価を行った内容は少ない。

本研究では ABC ルールの 3 つの条件の各種条件の組み合わせによりスピーチプライバシーをどの程度確保できるかを聴感評価実験を通して評価する。また、その音場をどの程度不快に感じるかを合わせて評価することで、スピーチプライバシーを確保しながら不快に感じない吸音・遮蔽・サウンドマスキングを掛け合わせた音場の条件を見つけることを目的とする。

## 2 研究内容

### 2.1 聴感評価実験

本研究では、音源に対して「スピーチプライバシーがどの程度確保できているか」、「どの程度不快に感じるか」という心理的要因をもとにした評価を行うため、作成した音源を実際に被験者が試聴することで評価する聴感評価実験を行った。被験者は 21～24 歳の健康な聴力を持つ男女計 12 名を対象とした。

### 3 研究手法

#### 3.1 波動音響理論

波動音響理論では、音波の振る舞いを

$$c^2 \left( \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (3.1)$$

で示される波動方程式、あるいは、それを導出するための運動方程式と連続方程式で記述する。ここで、 $c$  [m/s]は音速、 $p$  [N/m<sup>2</sup>]は音圧である。この式を離散化し、数値的に解くことで、音場を解析することを波動音響数値解析と呼ぶ。波動方程式を解くため、音波の波動性を考慮した正確な予測ができる一方、計算量が膨大であるため、予測できる対象や範囲に限られる。音響分野での波動音響数値解析では一般的に、境界要素法 (BEM)、時間領域有限差分法 (FDTD 法)、有限要素法 (FEM) が用いられる。幾何音響理論では、一般的に時間領域の解を得ることができるため、本論文では、上記のうち、同じ時間領域の解を容易に得ることができる FDTD 法<sup>7)</sup>を用いる。

FDTD 法とは、音場を空間的にも時間的にも離散化し、支配式の微分項を差分商で近似することにより解を得る手法である。空間的に離散化された一つ一つのセルには、Fig. 3.1 に示すように、音圧と粒子速度を互い違いに配置する。この空間的な配置のみを表した図を、Yee セルと呼ぶ。また、Fig. 3.2 に示すスタガードグリッドと呼ばれる格子によって、空間的な配置と時間的な配置を表すこともできる。FDTD 法では、空間的にも時間的にも互い違いに配置された音圧と粒子速度を、互い違いに計算するリープフロッグアルゴリズム (蛙跳び差分アルゴリズム)<sup>8)</sup>と呼ばれる手法を用いることで、音波の挙動を時間発展的に求めることができる。本研究では豊田<sup>9)</sup>の VA-FDTD を用いて計算を行った。

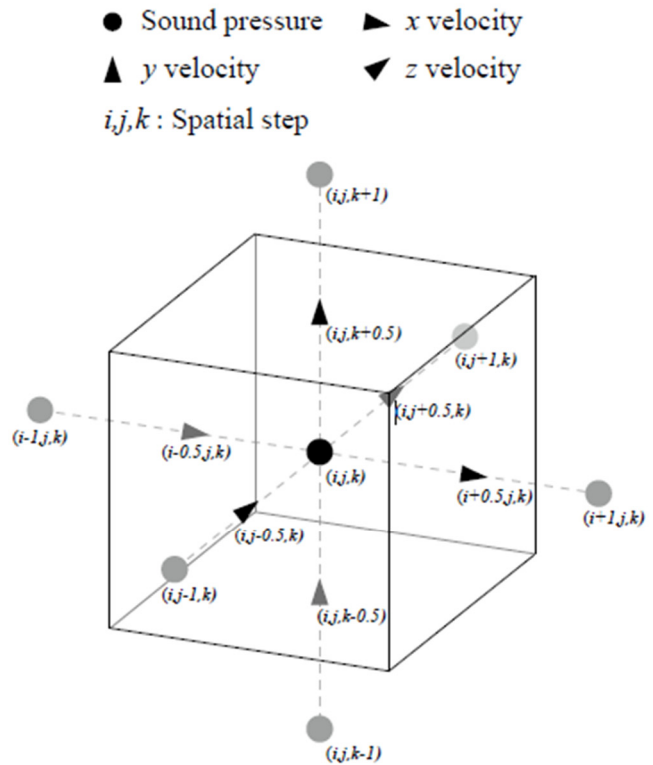


Fig. 3.1 Yee cell (three dimension)

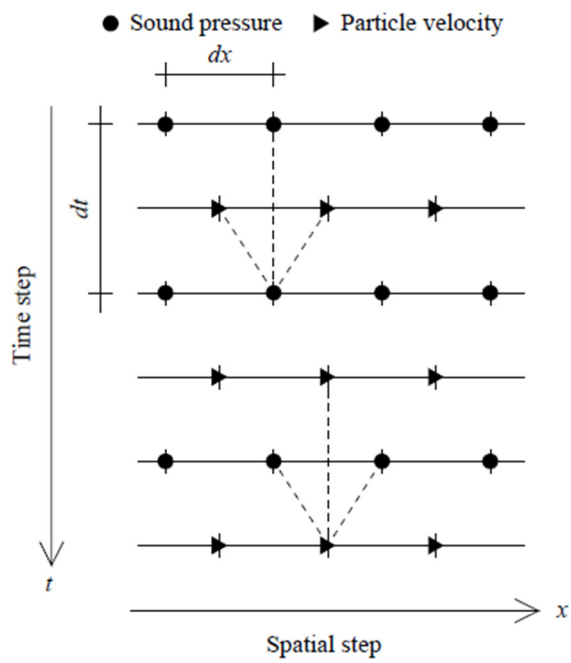


Fig. 3.2 Staggered grid (one dimension)



## 3.2 幾何音響理論

幾何音響理論では、音の波動性を無視し、音の伝搬を幾何学的に扱うことで音場を記述する。計算や可視化が容易である一方、音の波動性を無視しているため、波動現象が起こりやすい低音域において特に真値と誤差が生じる可能性が高い。幾何音響理論に基づく代表的な解析手法として音線法<sup>10)</sup>と虚像法<sup>11)</sup>が挙げられる。しかし、両手法ともに欠点がある。それを補うために、音線法と虚像法を組み合わせたバックトレース法<sup>12)</sup>とよばれる計算法が提案された。本論文では、このバックトレース法を採用する。バックトレース法の基本は音線法と虚像法であるが、本論文では割愛する。

バックトレース法とは、音線法と虚像法を組み合わせることにより、音線法の誤差を少なくし、かつ、虚像法の計算効率の悪さを補う手法である。

### (1) 計算手順

Fig. 3.3 にバックトレース法のフローチャートを示す（プログラムの表記は Fortran に準ずる）。まず、音線法によって反射経路のみを抽出し、その反射経路に基づいて虚音源を作成する。その虚音源が有効なものかを判定した後、有効虚音源のみを対象に虚像法により計算を行う。

### (2) 判定

バックトレース法における有効虚音源の判定は、虚像法における有効虚音源の判定ほど複雑なものではなく、音線法によって導き出された反射経路どおりに、虚音源がその反射経路をたどれるかどうかで判定を行う。Fig. 3.4 は音線法によって1→4という反射経路を通過して受音しており、それに基づいて虚音源を作成し、虚音源と受音点を結ぶと、同じように1→4と反射しているため、有効虚音源と判定できる場合を示したものである。Fig. 3.5 は音線法によって1→8という反射経路を通過して受音しており、それに基づいて虚音源を作成し、虚音源と受音点を結ぶと、1→8と反射した後に5にぶつかっており、音線法によって導かれた反射経路とは異なる反射経路を通過しているため、無効虚音源と判定される場合を示したものである。

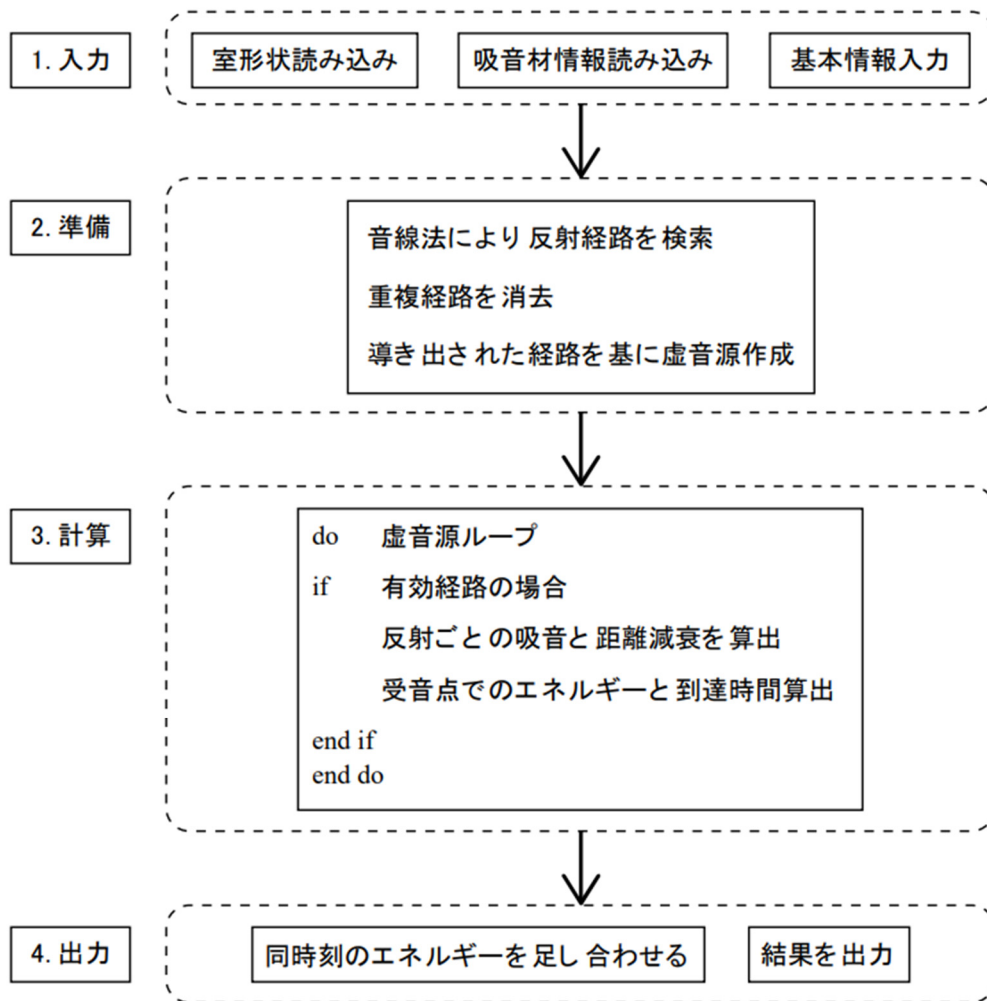


Fig. 3.3 Flow chart of backtracing method

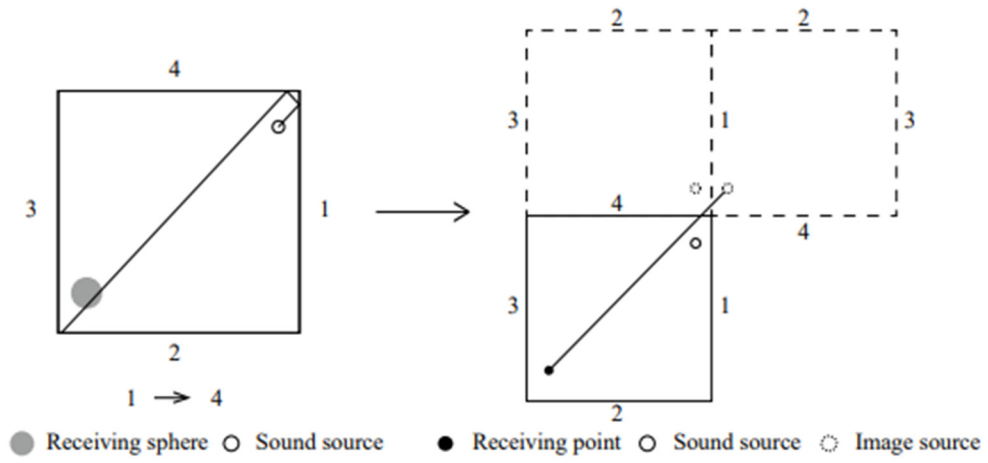


Fig. 3.4 Valid image source

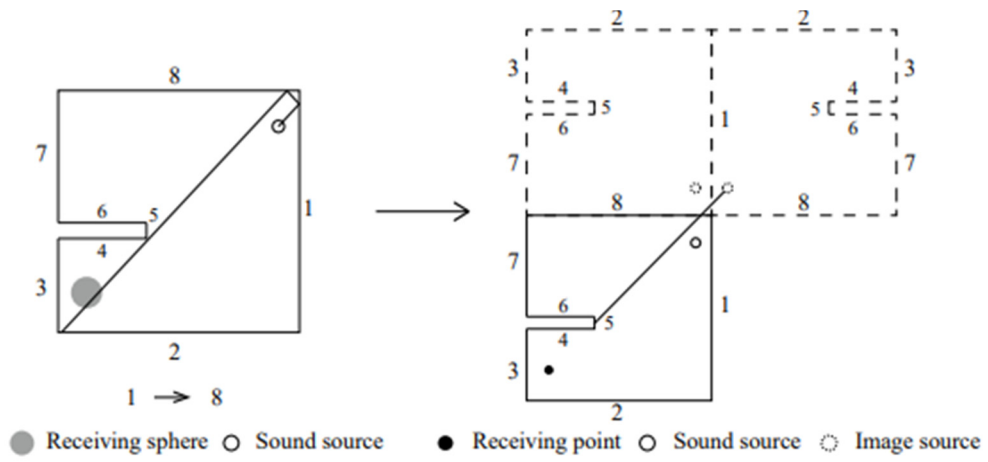


Fig. 3.5 Invalid image source

### 3.3 ハイブリッド音響解析

FDTD法は高精度だが計算に多大な時間が必要である。これに対しバックトレース法は短時間で計算できるがFDTD法に比べ低域での精度が劣るという特徴がある。本研究では、2つの解析方法を合成することにより短時間で高精度の計算ができるハイブリッド音場解析を用いて得たインパルス応答をもとに音源作成を行った。音源には男声朗読音を用いる。

#### 3.3.1 計算手順

低域は波動音響理論（FDTD法）、高域は幾何音響（バックトレース法）を用いた計算を行うが、これらを適切に処理する必要があるため、その計算手順を示す。低域と広域の境界となるクロスオーバー周波数は250 Hzの1オクターブ帯域の上限、すなわち、 $250 \times \sqrt{2}$ によって求まる周波数とする。本研究ではサンプリング周波数  $f_s = 44100$  Hzとした。

まず、バックトレース法の結果をフーリエ逆変換する。最初に、

$$p = \sum_{n=1}^N \sqrt{E_n} \frac{e^{ikr_n}}{r_n} \quad (3.2)$$

から周波数特性を算出する。ここで、 $p$ は音圧、 $N$ は有効虚音源数、 $E_n$ は $n$ 番目の虚音源のエネルギー、 $k$ は波数、 $r_n$ は $n$ 番目の虚音源と受音点の距離である。クロスオーバー波数以下の情報を削除するため、この周波数特性に帯域制限フィルタをかける。さらに、得られた結果をフーリエ逆変換し、時間領域にする。

これらの処理を踏まえ、FDTD法、バックトレース法それぞれの帯域制限されたインパルス応答を求める。しかし、FDTD法の入力信号のエネルギーの大きさと、バックトレース法で入力信号の大きさが異なるため、単純に足し合わせることができない。そこで、自由空間を対象としたFDTD解析、ならびに、バックトレース法による解析を行う必要がある。これらの結果から振幅の算術平均値を求め、比を得る。この比でインパルス応答を補正し、二つの手法を足し合わせることで、ハイブリッド解析のインパルス応答を算出する。以上がハイブリッド解析の手順である。Fig. 3.6にハイブリッド解析のフローチャートを示す。

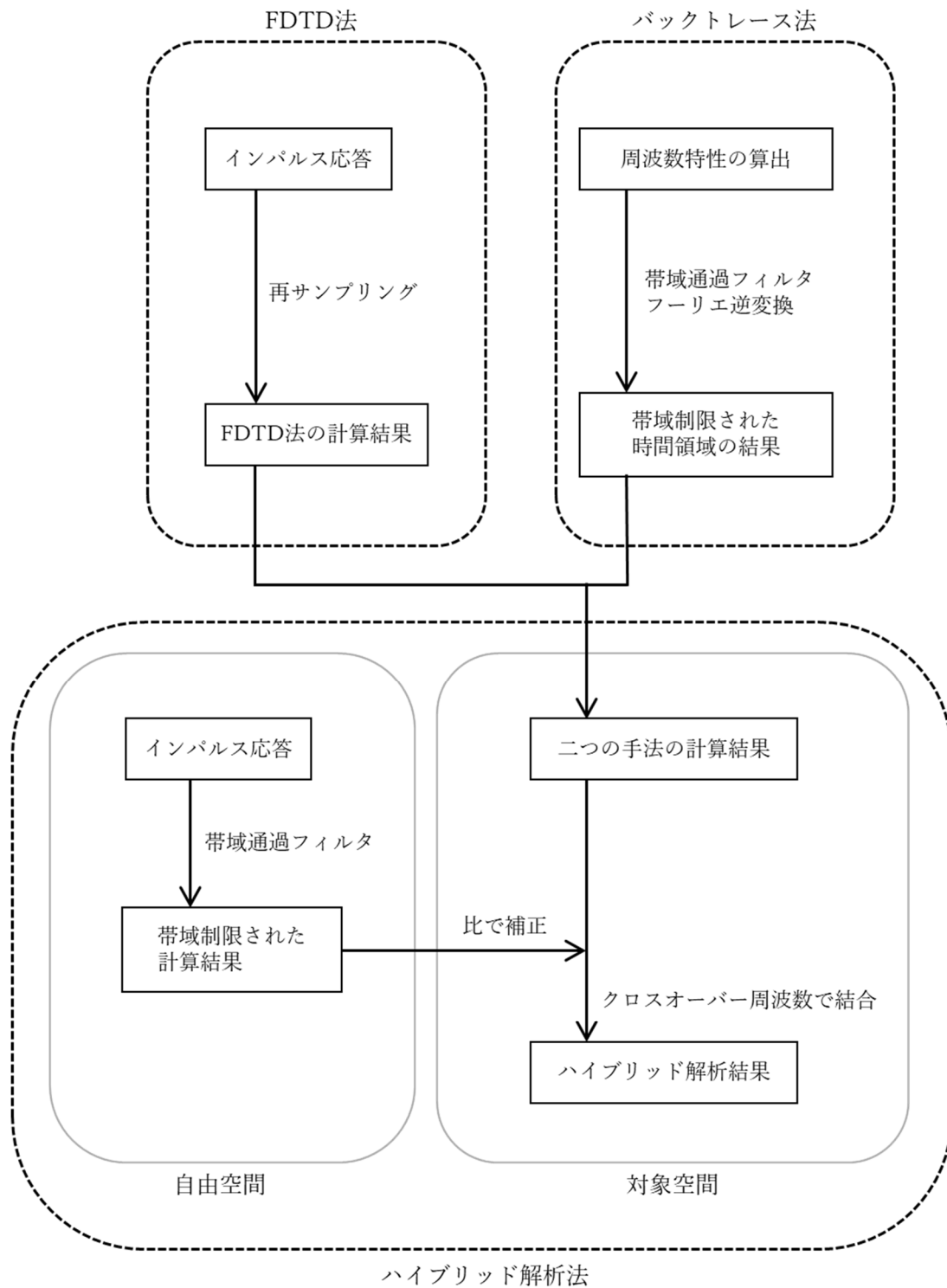


Fig.3.6 Flow chart of hybrid analysis

### 3.3.2 対象空間

音源作成に使用する対象空間を Fig. 3.7 に示す。1 辺を 3 m とする立方体であり、壁面には完全吸音性を付することで無限に広い空間を模擬する。床面・天井面は吸音率を任意に変更する。衝立は 1 辺 2 m の正方形のもの音源と受音点の中心位置に来るように配置する。音源・受音点の床面からの高さは 1.7 m とする。

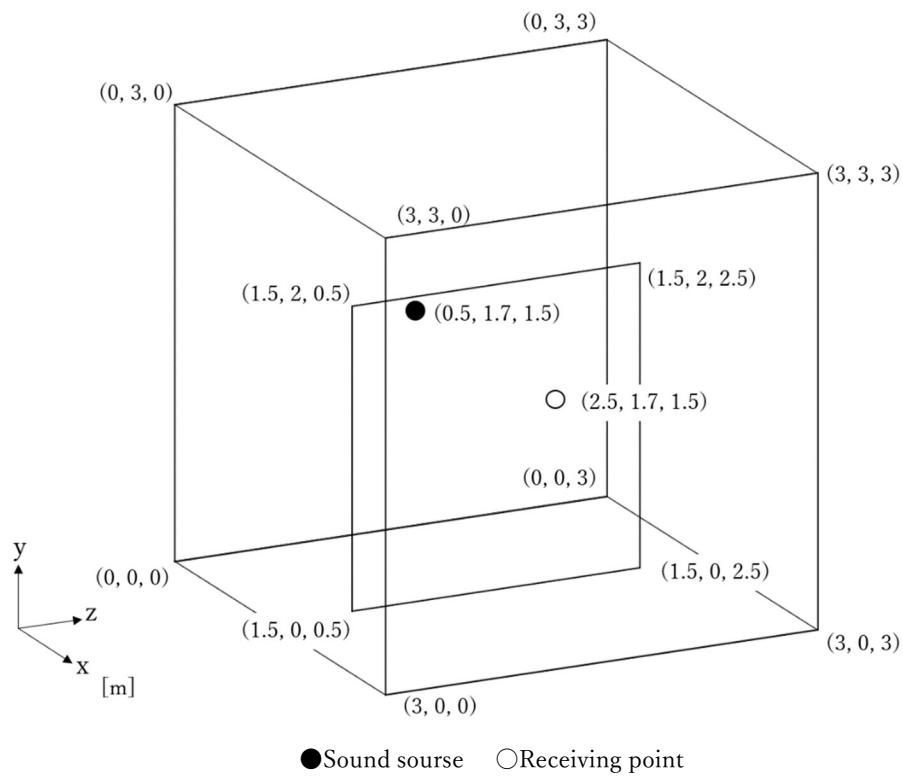


Fig. 3.7 shape of model

### 3.4 サウンドマスキング音

前項の解析方法をもとに作られた音源にマスキング音を付与することで、サウンドマスキングを合わせた音場の再現を行う。なお、マスキング音には空間の影響を考慮しないこととする。

マスキングの種類によってマスキング効果や人が感じる不快感に差が生じるため、本研究では自然音・雑音・雑踏音の3種類のマスキング音を使用する。自然音は「波の音 (wave)」、雑音は「ピンクノイズ (pinknoise)」、雑踏音は「商店街の音 (syoutengai)」を使用する。また、これらのマスキング音については等価騒音レベル  $L_{Aeq}$  を揃えた上で、「鮮明に聞き取れる」程度から「まったく聞き取れない」程度までが含まれるように2種の倍率を乗じて音源に付与した。以下では、倍率の小さいものを「-(S)」(Soft)、大きいものを「-(L)」(Loud)とする。

### 3.5 音源の種類

実験に使用した音源は、Fig. 3.8 に示すように、床面、天井面の吸音率  $\alpha$  を 0.1, 0.5, 0.9 (3種類)、衝立の有無 (2種類)、先述した6種のマスキング音にマスキングの無い状態を加えたもの (7種類) をそれぞれ組み合わせた計 42 種類である。

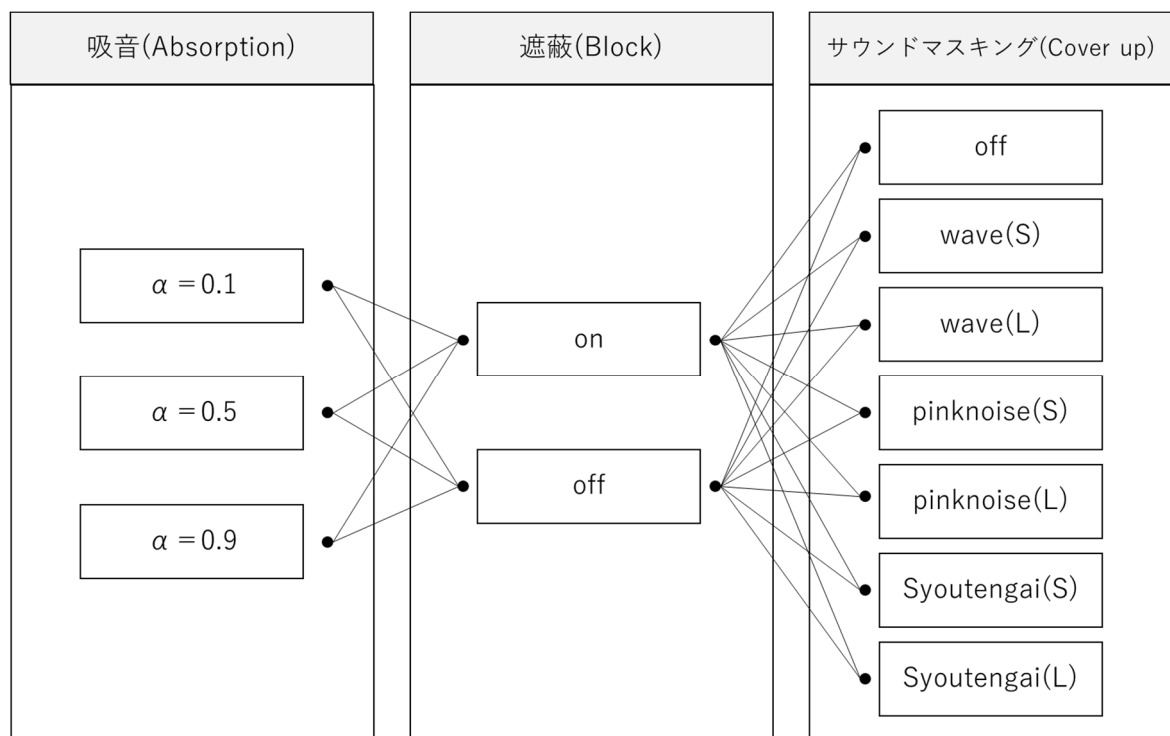


Fig. 3.8 Combination patterns

### 3.6 評価方法

各種条件を組み合わせた室内での男声朗読を再現し、ヘッドホンを通して試聴する。先述した42種類の音声を各種2回分（計84回分）用意し、ランダムに並び替えて再生し、音声の「聴き取りにくさ」、音全体としての「不快さ」の2項目に対して4段階の評価をさせた。1つ目の評価項目である「聴き取りにくさ」については森本ら<sup>13)</sup>によって提案された評価方法を使用する。聴き取りにくさを「聴き取りにくくない」から「非常に聴き取りにくい」のFig. 3.9に示す4段階のカテゴリで評価させる。集計は通常のカテゴリ評価とは異なり「聴き取りにくい」と回答した割合、すなわち2~4を回答した割合を算出する。これにより程度に違いはあるが「聴き取りにくい」と回答した数の合計が全回答数に占める割合を求めることで、スピーチプライバシーが確保されている音声かどうかを評価するものとする。したがって、本研究においては「聴き取りにくさ」は数値が高いほどスピーチプライバシーの性能が高いものとして評価する。また、「不快さ」についてもFig. 3.10に示す4段階のカテゴリで評価し、聴き取りにくさと同様に2~4と答えた人の割合から不快に感じる人の割合を算出する。したがって、「不快さ」の項目は数値が低いほど快適であるものとして評価する。次項から評価結果についての分析を行うが、横軸に「聴き取りにくさ [%]」、縦軸に「不快さ [%]」を取った散布図（Fig. 3.11）を使用する。本研究における評価指標では図の右下部が評価の高いデータ、左上部が評価の低いデータとなる。



1	聞き取りにくくはない	(Not difficult)
2	やや 聞き取りにくい	(A little difficult)
3	かなり 聞き取りにくい	(Fairly difficult)
4	非常に 聞き取りにくい	(Extremely difficult)

Fig.3.9 Categories of listening difficulty

1	不快でない	(Not discomfort)
2	やや 不快である	(A little discomfort)
3	かなり 不快である	(Fairly discomfort)
4	非常に 不快である	(Extremely discomfort)

Fig.3.10 Categories of degree of discomfort

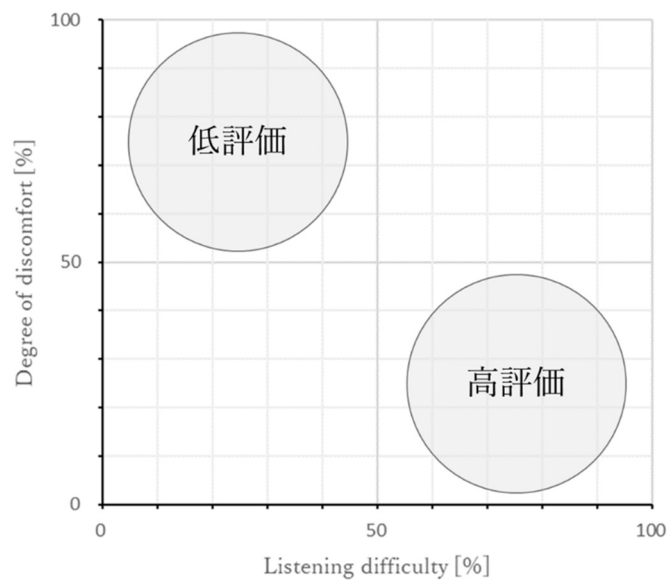


Fig. 3.11 Evaluation plot

## 4 研究結果

### 4.1 回答結果

「聴き取りにくさ」に対する項目別の回答人数を Table 4.1 に、「不快さ」に対する項目別の回答人数を Table. 4.2 に示す。また、2つの評価項目について2~4を回答した人の割合を Table. 4.3 に示す。

No.	吸音率	衝立	マスキング	音量	聞き取りにくい	やや聞き取りにくい	かなり聞き取りにくい	非常に聞き取りにくい
1	0.1	off	-	-	22	2	0	0
2	0.5	off	-	-	22	2	0	0
3	0.9	off	-	-	24	0	0	0
4	0.1	on	-	-	21	3	0	0
5	0.5	on	-	-	15	8	1	0
6	0.9	on	-	-	10	11	3	0
7	0.1	off	wave	(S)	11	12	1	0
8	0.5	off	wave	(S)	21	3	0	0
9	0.9	off	wave	(S)	18	6	0	0
10	0.1	on	wave	(S)	7	14	3	0
11	0.5	on	wave	(S)	1	16	7	0
12	0.9	on	wave	(S)	0	1	13	10
13	0.1	off	pinknoise	(S)	14	9	1	0
14	0.5	off	pinknoise	(S)	14	9	1	0
15	0.9	off	pinknoise	(S)	9	15	0	0
16	0.1	on	pinknoise	(S)	7	14	3	0
17	0.5	on	pinknoise	(S)	0	7	11	6
18	0.9	on	pinknoise	(S)	0	2	13	9
19	0.1	off	syoutengai	(S)	23	1	0	0
20	0.5	off	syoutengai	(S)	24	0	0	0
21	0.9	off	syoutengai	(S)	22	2	0	0
22	0.1	on	syoutengai	(S)	14	10	0	0
23	0.5	on	syoutengai	(S)	3	13	8	0
24	0.9	on	syoutengai	(S)	0	1	15	8
25	0.1	off	wave	(L)	7	12	5	0
26	0.5	off	wave	(L)	2	7	13	2
27	0.9	off	wave	(L)	4	11	8	1
28	0.1	on	wave	(L)	1	5	12	6
29	0.5	on	wave	(L)	0	0	10	14
30	0.9	on	wave	(L)	0	0	0	24
31	0.1	off	pinknoise	(L)	2	8	12	2
32	0.5	off	pinknoise	(L)	2	8	12	2
33	0.9	off	pinknoise	(L)	0	7	15	2
34	0.1	on	pinknoise	(L)	0	3	7	14
35	0.5	on	pinknoise	(L)	0	0	6	18
36	0.9	on	pinknoise	(L)	0	0	0	24
37	0.1	off	syoutengai	(L)	13	11	0	0
38	0.5	off	syoutengai	(L)	5	15	4	0
39	0.9	off	syoutengai	(L)	8	10	6	0
40	0.1	on	syoutengai	(L)	1	7	13	3
41	0.5	on	syoutengai	(L)	0	0	11	13
42	0.9	on	syoutengai	(L)	0	0	2	22

Table. 4.1 Answer results for Listening difficulty

No.	吸音率	衝立	マスキング	音量	不快でない	やや不快である	かなり不快である	非常に不快である
1	0.1	off	-	-	7	14	3	0
2	0.5	off	-	-	14	6	4	0
3	0.9	off	-	-	15	8	1	0
4	0.1	on	-	-	11	10	2	1
5	0.5	on	-	-	15	8	1	0
6	0.9	on	-	-	16	5	2	1
7	0.1	off	wave	(S)	13	8	3	0
8	0.5	off	wave	(S)	14	9	1	0
9	0.9	off	wave	(S)	19	5	0	0
10	0.1	on	wave	(S)	11	10	3	0
11	0.5	on	wave	(S)	12	11	1	0
12	0.9	on	wave	(S)	8	12	4	0
13	0.1	off	pinknoise	(S)	1	12	9	2
14	0.5	off	pinknoise	(S)	0	11	9	4
15	0.9	off	pinknoise	(S)	1	11	7	5
16	0.1	on	pinknoise	(S)	0	15	5	4
17	0.5	on	pinknoise	(S)	0	10	10	4
18	0.9	on	pinknoise	(S)	1	5	12	6
19	0.1	off	syoutengai	(S)	14	9	1	0
20	0.5	off	syoutengai	(S)	19	5	0	0
21	0.9	off	syoutengai	(S)	16	8	0	0
22	0.1	on	syoutengai	(S)	17	7	0	0
23	0.5	on	syoutengai	(S)	14	9	1	0
24	0.9	on	syoutengai	(S)	12	9	3	0
25	0.1	off	wave	(L)	2	10	10	2
26	0.5	off	wave	(L)	3	8	11	2
27	0.9	off	wave	(L)	2	14	7	1
28	0.1	on	wave	(L)	1	13	8	2
29	0.5	on	wave	(L)	4	8	9	3
30	0.9	on	wave	(L)	4	9	9	2
31	0.1	off	pinknoise	(L)	0	5	6	13
32	0.5	off	pinknoise	(L)	0	2	3	19
33	0.9	off	pinknoise	(L)	0	0	5	19
34	0.1	on	pinknoise	(L)	0	1	4	19
35	0.5	on	pinknoise	(L)	0	0	4	20
36	0.9	on	pinknoise	(L)	0	1	2	21
37	0.1	off	syoutengai	(L)	7	12	4	1
38	0.5	off	syoutengai	(L)	9	10	3	2
39	0.9	off	syoutengai	(L)	4	16	3	1
40	0.1	on	syoutengai	(L)	5	12	4	3
41	0.5	on	syoutengai	(L)	5	13	4	2
42	0.9	on	syoutengai	(L)	12	6	3	3

Table. 4.2 Answer results for Degree of discomfort

吸音率	衝立	マスキング	音量	聴き取りにくさ	不快さ
0.1	off	off	off	8.33	70.83
0.5	off	off	off	8.33	41.67
0.9	off	off	off	0.00	37.50
0.1	on	off	off	12.50	54.17
0.5	on	off	off	37.50	37.50
0.9	on	off	off	58.33	33.33
0.1	off	wave	(S)	54.17	45.83
0.5	off	wave	(S)	12.50	41.67
0.9	off	wave	(S)	25.00	20.83
0.1	on	wave	(S)	70.83	54.17
0.5	on	wave	(S)	95.83	50.00
0.9	on	wave	(S)	100.00	66.67
0.1	off	pinknoise	(S)	41.67	95.83
0.5	off	pinknoise	(S)	41.67	100.00
0.9	off	pinknoise	(S)	62.50	95.83
0.1	on	pinknoise	(S)	70.83	100.00
0.5	on	pinknoise	(S)	100.00	100.00
0.9	on	pinknoise	(S)	100.00	95.83
0.1	off	syoutengai	(S)	4.17	41.67
0.5	off	syoutengai	(S)	0.00	20.83
0.9	off	syoutengai	(S)	8.33	33.33
0.1	on	syoutengai	(S)	41.67	29.17
0.5	on	syoutengai	(S)	87.50	41.67
0.9	on	syoutengai	(S)	100.00	50.00
0.1	off	wave	(L)	70.83	91.67
0.5	off	wave	(L)	91.67	87.50
0.9	off	wave	(L)	83.33	91.67
0.1	on	wave	(L)	95.83	95.83
0.5	on	wave	(L)	100.00	83.33
0.9	on	wave	(L)	100.00	83.33
0.1	off	pinknoise	(L)	91.67	100.00
0.5	off	pinknoise	(L)	91.67	100.00
0.9	off	pinknoise	(L)	100.00	100.00
0.1	on	pinknoise	(L)	100.00	100.00
0.5	on	pinknoise	(L)	100.00	100.00
0.9	on	pinknoise	(L)	100.00	100.00
0.1	off	syoutengai	(L)	45.83	70.83
0.5	off	syoutengai	(L)	79.17	62.50
0.9	off	syoutengai	(L)	66.67	83.33
0.1	on	syoutengai	(L)	95.83	79.17
0.5	on	syoutengai	(L)	100.00	79.17
0.9	on	syoutengai	(L)	100.00	50.00

Table. 4.3 List of evaluation results (Listening difficulty and Degree of discomfort)

## 4.2 Absorption (吸音) による評価結果

### 4.2.1 吸音のみによる効果

まず初めに、吸音のみによる効果を評価するために、衝立無し・マスキング無しの状態での評価結果を Fig. 4.1、Table. 4.4 に示す。吸音率を上げることにより不快感は減少しているが、反響が少なくより鮮明に聞こえるため、吸音のみではスピーチプライバシーの保護効果は薄いと言える。

### 4.2.2 吸音と遮蔽による効果

次に、吸音率の変化が遮蔽にどのような影響を与えるかを評価するために、衝立あり・マスキング無しの状態での評価結果を Fig. 4.2、Table. 4.5 に示す。この結果では吸音率が上がるほどスピーチプライバシーの効果が上昇していることに加え、不快感も減少している。このことから衝立を設置する場合については吸音率が高い床・天井は効果的であることがわかる。

### 4.2.3 吸音とサウンドマスキングによる効果

次に、吸音率の変化がサウンドマスキングにどのような影響を与えるかを評価するために、衝立無し・マスキング音が小さい状態での評価結果を Fig. 4.3、Table. 4.6 に示す。この結果からは聞き取りにくさと不快感の相関が少ないことがわかる。衝立が無い場合直接音が聞き取りやすく、マスキング音と重なることで多くの音が聞こえ、不快感をおおる結果となったと考える。また、同様に衝立無し・マスキング音が大きい状態での評価結果を Fig. 4.4、Table 4.7 に示す。この結果からも吸音率とマスキングの相乗的な効果は見込めず、聞き取りにくさは上昇しているが、不快さを感じる結果となっており、適切な音場ということとはできない。

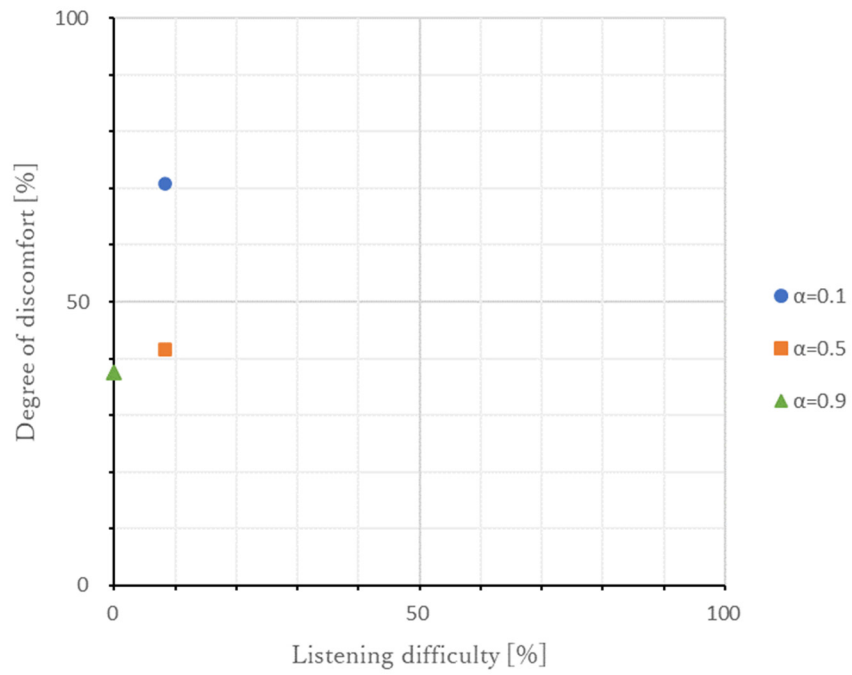


Fig. 4.1 Plots of evaluation results ( $\alpha=0.1\sim0.9$ , B=off, C=off)

吸音率	衝立	マスキング	音量	聞き取りにくさ	不快さ
0.1	off	off	off	8.33	70.83
0.5	off	off	off	8.33	41.67
0.9	off	off	off	0.00	37.50

Table. 4.4 List of evaluation results ( $\alpha=0.1\sim0.9$  B=off C=off)

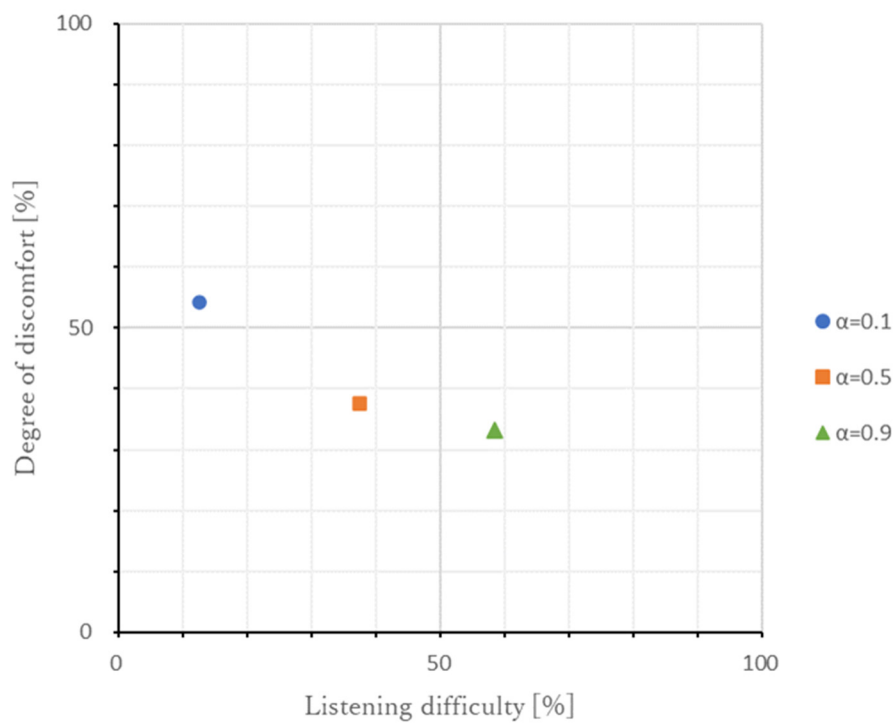


Fig. 4.2 Plots of evaluation results (A=0.1~0.9, B=on, C=off)

吸音率	衝立	マスキング	音量	聴き取りにくさ	不快さ
0.1	on	off	off	12.50	54.17
0.5	on	off	off	37.50	37.50
0.9	on	off	off	58.33	33.33

Table. 4.5 List of evaluation results (A=0.1~0.9, B=on, C=off)

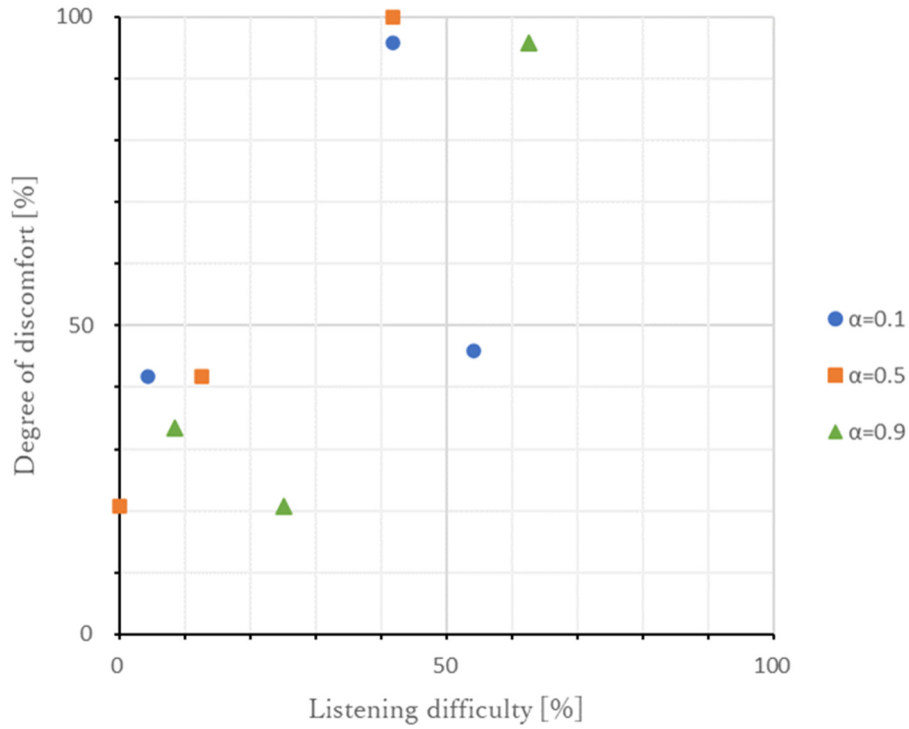


Fig. 4.3 Plots of evaluation results (A=0.1~0.9, B=off, C=soft)

吸音率	衝立	マスキング	音量	聴き取りにくさ	不快さ
0.1	off	wave	(S)	54.17	45.83
0.1	off	pinknoise	(S)	41.67	95.83
0.1	off	syoutengai	(S)	4.17	41.67
0.5	off	wave	(S)	12.50	41.67
0.5	off	pinknoise	(S)	41.67	100.00
0.5	off	syoutengai	(S)	0.00	20.83
0.9	off	wave	(S)	25.00	20.83
0.9	off	pinknoise	(S)	62.50	95.83
0.9	off	syoutengai	(S)	8.33	33.33

Table. 4.6 List of evaluation results (A=0.1~0.9, B=off, C=soft)



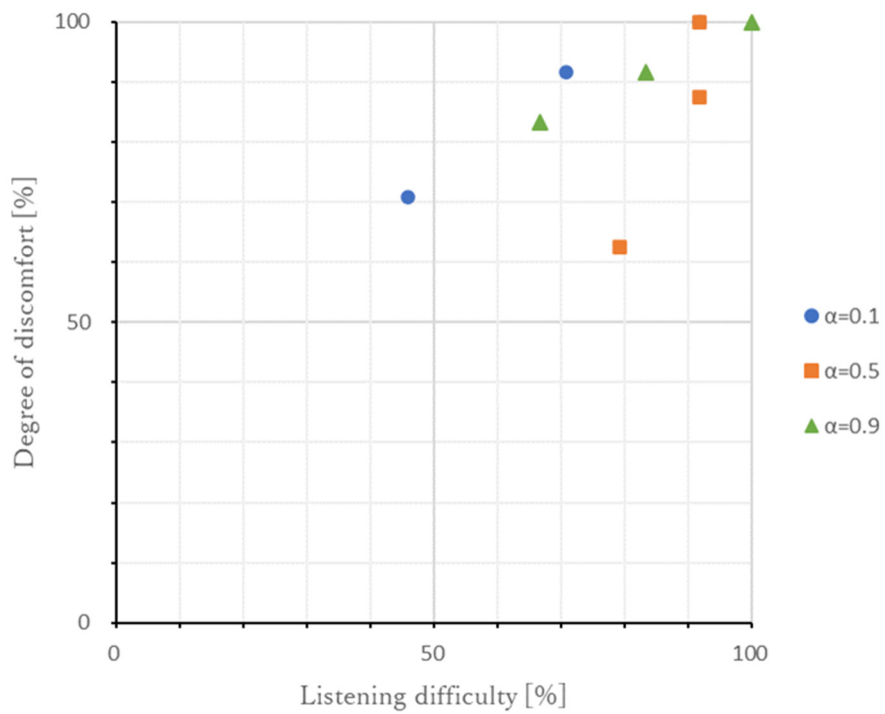


Fig. 4.4 Plots of evaluation results (A=0.1~0.9, B=off, C=Loud)

吸音率	衝立	マスキング	音量	聞き取りにくさ	不快さ
0.1	off	wave	(L)	70.83	91.67
0.1	off	pinknoise	(L)	91.67	100.00
0.1	off	syoutengai	(L)	45.83	70.83
0.5	off	wave	(L)	91.67	87.50
0.5	off	pinknoise	(L)	91.67	100.00
0.5	off	syoutengai	(L)	79.17	62.50
0.9	off	wave	(L)	83.33	91.67
0.9	off	pinknoise	(L)	100.00	100.00
0.9	off	syoutengai	(L)	66.67	83.33

Table. 4.7 List of evaluation results (A=0.1~0.9, B=off, C=Loud)

### 4.3 Block (遮蔽) による評価結果

遮蔽のみによる効果を検討するが、床・天井がない状態での評価は現実的でなく、また、データ数も小さくなるため、各吸音率におけるマスキング音が無い状態での効果を検討するものとする。結果を Fig.4.5、Table. 4.8 に示す。衝立が無い場合では、直接音のエネルギーを減らすことができずスピーチプライバシー効果が薄くなっている。これに対して衝立がある場合では、スピーチプライバシー効果と不快感の軽減の両方を達成しており、遮蔽による効果が確認できる。

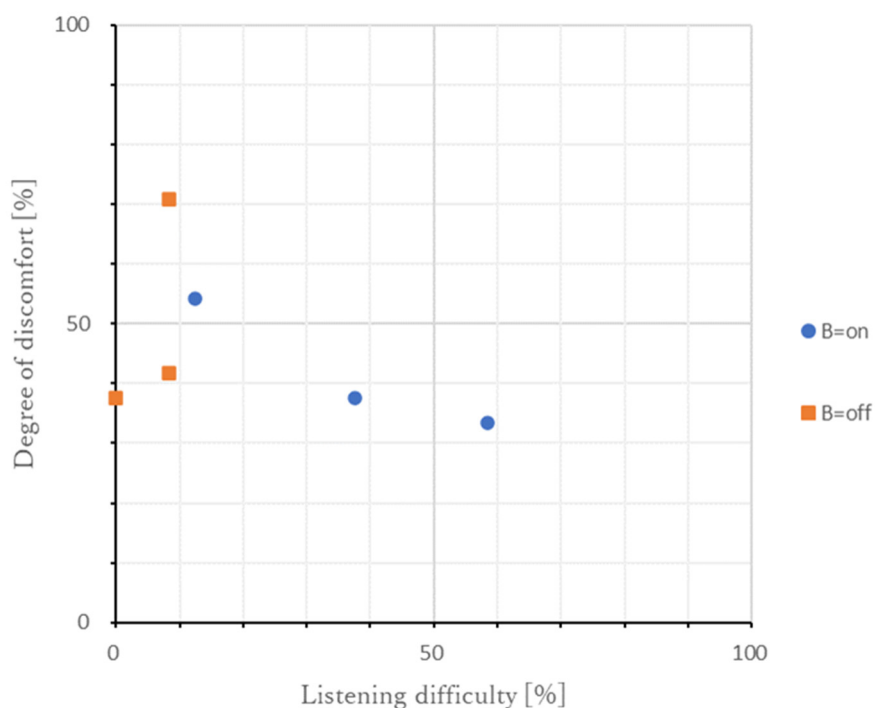


Fig. 4.5 Plots of evaluation results (A=0.1~0.9, B=on/off, C=off)

吸音率	衝立	マスキング	音量	聞き取りにくさ	不快感
0.1	on	off	off	12.50	54.17
0.5	on	off	off	37.50	37.50
0.9	on	off	off	58.33	33.33
0.1	off	off	off	8.33	70.83
0.5	off	off	off	8.33	41.67
0.9	off	off	off	0.00	37.50

Table. 4.8 List of evaluation results (A=0.1~0.9, B=on/off, C=off)

## 4.4 Cover up (サウンドマスキング) による評価結果

サウンドマスキングのみによる効果を検討するが、4.3 と同様に床・天井がない状態での評価は現実的でないため、吸音率はある一定の状態 ( $\alpha=0.5$ ) を考える。衝立がない状態での、マスクの大小による評価結果を Fig. 4.6、Table. 4.9 に示す。マスキング音が大きい場合のほうがスピーチプライバシー効果は高いが、大きすぎるマスクにより不快感を抱く回答が多い結果となった。

### 4.4.1 マスクの種類による評価結果

次に、マスクの種類による評価結果を比較するために、マスキング音の大小を併せて Fig. 4.7、Table. 4.10 に示す。ここでは雑音 (pinknoise) の音に対して不快と回答する割合が多く、次いで自然音である波 (wave) の音、商店街 (syoutengai) の音の順となる。自然音である波の音が実験空間である教室と波の音の情報が一致しないことも不快感を感じる結果に繋がったと考える。

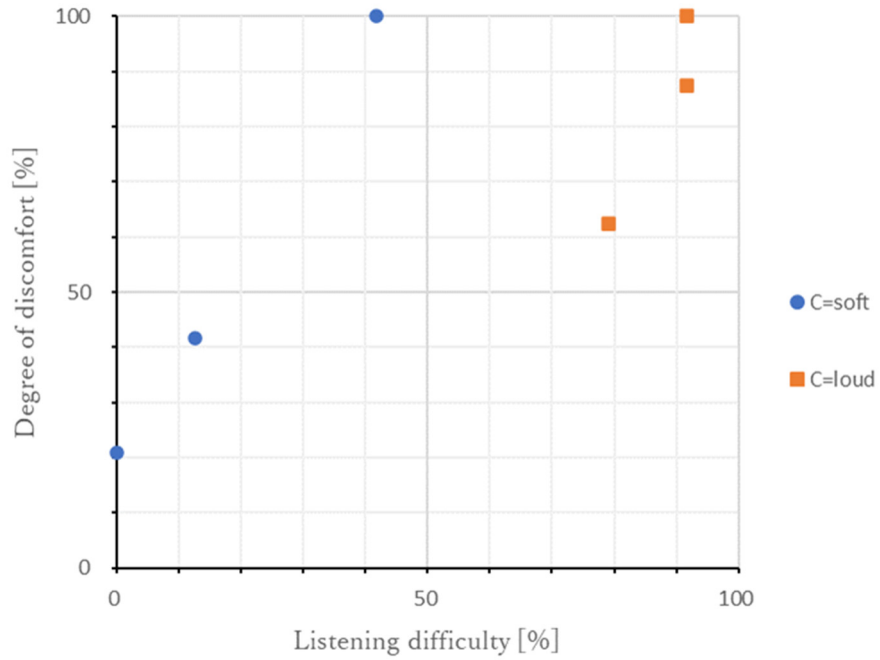


Fig. 4.6 Plots of evaluation results (A=0.5, B=off, C=soft/loud)

吸音率	衝立	マスキング	音量	聴き取りにくさ	不快さ
0.5	off	wave	(S)	12.50	41.67
0.5	off	pinknoise	(S)	41.67	100.00
0.5	off	syoutengai	(S)	0.00	20.83
0.5	off	wave	(L)	91.67	87.50
0.5	off	pinknoise	(L)	91.67	100.00
0.5	off	syoutengai	(L)	79.17	62.50

Table. 4.9 List of evaluation results (A=0.5, B=off, C=soft/loud)

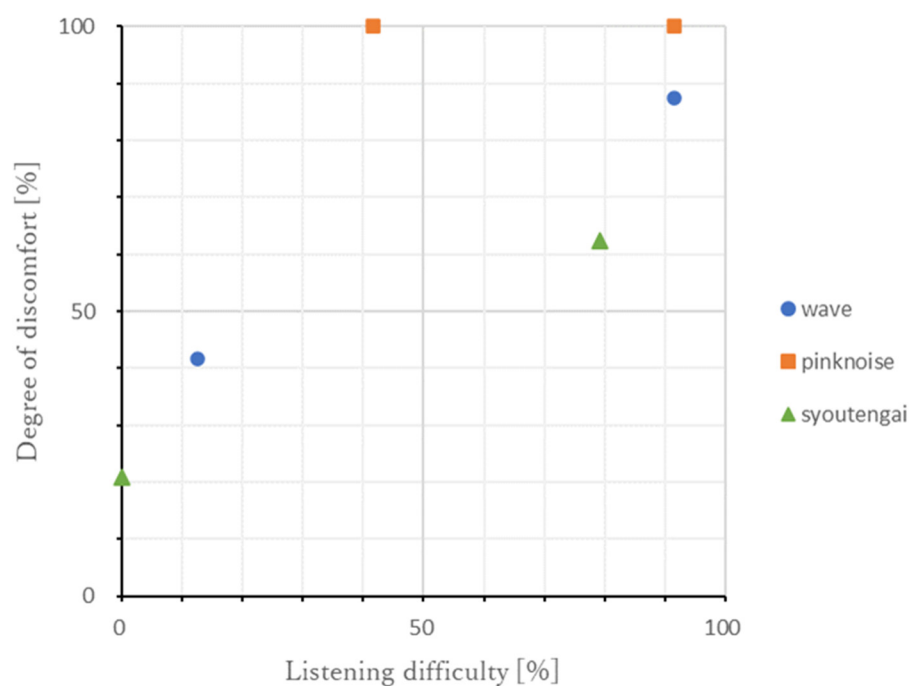


Fig. 4.7 Plots of evaluation results (A=0.5, B=off, C=wave/pinknoise/syoutengai)

吸音率	衝立	マスキング	音量	聞き取りにくさ	不快さ
0.5	off	wave	(S)	12.50	41.67
0.5	off	wave	(L)	91.67	87.50
0.5	off	pinknoise	(S)	41.67	100.00
0.5	off	pinknoise	(L)	91.67	100.00
0.5	off	syoutengai	(S)	0.00	20.83
0.5	off	syoutengai	(L)	79.17	62.50

Table. 4.10 List of evaluation results (A=0.5, B=off, C=wave/pinknoise/syoutengai)

#### 4.5 ABC ルールを掛け合わせた評価結果

全 42 種類の条件に付いて、同様の評価を行った結果を Fig. 4.8 に示す。各種条件と数値については Table 4.3 を参照されたい。本研究の評価指標である「聴き取りにくさ」に対して 50%以上の数値となり、「不快さ」に対して 50%以下の数値となった条件は図中右下に示した点となる。この際の条件を Table 4.11 に示す。吸音率に着目すると  $\alpha=0.9$  のときに高い評価を得ており、吸音におけるスピーチプライバシーに対する効果が証明できる結果となった。遮蔽に着目すると 6 項目中 5 項目が衝立がある状態となっており、効果があることは歴然である。サウンドマスキングに関しては、音量が小さいときに不快感が軽減されるため高い評価を得る結果となった。

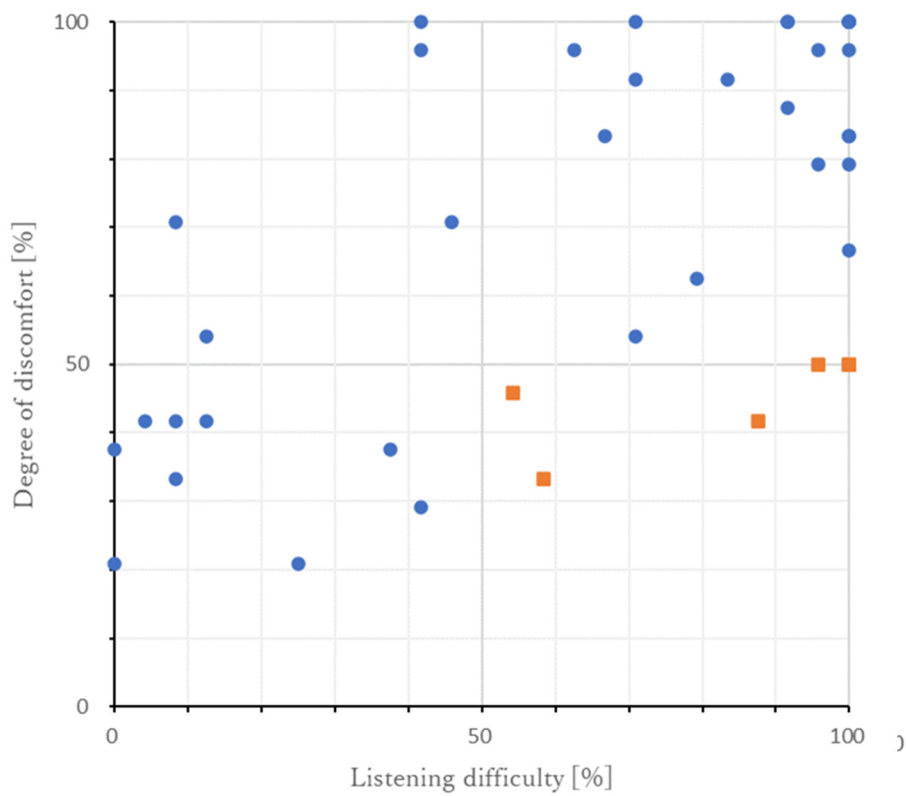


Fig. 4.8 Plots of evaluation results (all data)

吸音率	衝立	マスキング	音量	聞き取りにくさ	不快さ
0.1	off	wave	(S)	54.17	45.83
0.5	on	wave	(S)	95.83	50.00
0.5	on	syoutengai	(S)	87.50	41.67
0.9	on	off	off	58.33	33.33
0.9	on	syoutengai	(S)	100.00	50.00
0.9	on	syoutengai	(L)	100.00	50.00

Table. 4.11 List of evaluation results (conditions of high performance)

## 5 おわりに

本研究では ABC ルールを組み合わせることにより、スピーチプライバシーが保護されながらも不快でない音場の条件を探索することを目的としていたが、能動的な対策である遮蔽やサウンドマスキングに加え、設計段階から吸音率を考慮することでより高い効果を得られることが一部確認できた。しかしながら、今回対象とした空間は壁面の無い無限に広い空間を対象にしていることや、マスキング音を後から付与していることによって互いの干渉や指向性を考慮できていないため、実空間での結果は今回の結果と異なる可能性がある。今後の展望としては、壁面を想定した空間を想定することやマスキング音を音源として計算内に組み込むことでより正確な効果を予測することが考えられる。



## 参考文献

- 1) 羽入 敏樹 他：調剤薬局におけるスピーチプライバシー保護：その2 パーティションおよびサウンドマスキングの効果，日本建築学会大会学術講演梗概集，D-1， 297-300， 2008.
- 2) 李 孝珍 他：調剤薬局におけるサウンドマスキングシステムの効果に関する実験室実験，日本音響学会建築音響研究会資料，AA2015-15， 2015.
- 3) 佐藤 逸人 他：病院診察室におけるスピーチプライバシーの心理評価，日本音響学会講演論文集，2012（秋季）.
- 4) 小杉 秀彰 他：オフィス空間へのサウンドマスキングシステムの効果による研究，日本音響学会建築音響研究会資料，AA2011-34， 2011.
- 5) 池上 雅之 他：会議室の遮音対策におけるサウンドマスキング用のBGMの音量設定に関する検討，日本建築学会大会学術講演梗概集，D-1， 345-346， 2010.
- 6) 佐藤 洋 他：スピーチプライバシー研究の歴史と近年の動向，日本音響学会誌 64 巻 8 号， 475-480， 2008.
- 7) 日本建築学会編：“音環境の数値シミュレーションー波動音響解析の技術と応用ー”，丸善，東京，2011.
- 8) 豊田 政弘：『VA-FDTD』 [https://www2.kansai-u.ac.jp/va-fdtd/index\\_jp.html](https://www2.kansai-u.ac.jp/va-fdtd/index_jp.html)
- 9) 千葉 修 他：“リープフロッグアルゴリズムに基づく時間依存差分法による音場解析”，日本音響学会誌，49(8)， 551-562， 1993.
- 10) 日本建築学会編：“はじめての音響数値シミュレーションプログラミングガイド”，コロナ社，東京，2012.
- 11) J. Borish: “Extension of the image model to arbitrary polyhedral”, J. Acoust. Soc. Am., 75(6), 1827-1836, 1984.
- 12) M. Vorländer: “Simulation of the transient and steady-state sound propagation in rooms using a new combined ray-tracing/image-source algorithm”, J. Acoust. Soc. Am., 86(1), 172-178, 1989.
- 13) M. Morimoto, H. Sato, and M. Kobayashi: “Listening difficulty as a subjective measure for evaluation of speech transmission performance in public spaces,” J. Acoust. Soc. Am. 116, 1607-1613, 2004.