

室内音響設計のための  
三次元音場再現システムの開発について

関西大学 環境都市工学部 建築学科

建築環境工学第I研究室

建 13-53 鈴木 裕次朗

指導教官 豊田 政弘 准教授

# 目次

1	はじめに	3
1.1	研究背景	3
1.2	研究目的	4
2	VBAP	5
2.1	VBAP とは	5
2.2	二次元 VBAP	6
2.3	三次元 VBAP	8
3	立体音響再生装置	10
3.1	使用機材・ソフトウェア	10
3.1.1	パワードスピーカー	10
3.1.2	オーディオインターフェイス	11
3.1.3	再生ソフトウェア	12
3.2	開発したシステム	13
4	聴感評価実験	18
4.1	実験方法	18
4.2	評価方法	22
4.3	結果・考察	23
5	総括	27

参考文献

# 1 はじめに

## 1.1 研究背景

現在に至るまで、多くの三次元音場再生手法が提案されてきている。三次元音場再生手法とは、三次元的な音の到来方向や音像までの距離、音の拡がりなどを再生する手法のことである。現在では、VR (Virtual Reality)や映画館など、さまざまな所で利用されている。また、三次元音場再生はホールやライブ会場などの音環境を立体的に再現することができるため、室内音響設計にも利用されている。

コンサートホールなど、音響設計を重視するような施設の内部を良い音響空間にするためには、設計の初期段階で室形状や適切な音響的処置を検討しておく必要がある。このとき、ホール内の音場をその響きも含めて立体的に再現することが出来れば、設計意図通りの特性が得られるかを、聴覚的に確認、および、評価することが出来ると考えられる。現在提案されているシステムがいくつかあるが、スピーカー数が多く、コストが高くなっている。

## 1.2 研究目的

前節で述べた研究背景から、設計段階で空間の音場を仮想的に再現できる、低コストで簡易な三次元音場再現システムを開発し、より良い室内音響設計の実現に貢献することを本研究の目的とする。

## 2 VBAP

### 2.1 VBAP とは

本研究で用いる VBAP (Vector-Based Amplitude Panning)[1]について説明する。VBAP とは、三次元音場再生手法の一つであり、複数のスピーカ-の音量差によって音像定位を表現する振幅パニングに基づいている。図 1 のように、複数のスピーカ-を聴取者の周りの任意の場所に等距離で配置し、二次元、もしくは、三次元の音場を再現することを可能にしている。音像をスピーカ-で囲まれた音場のあらゆる方向に定位させることができる手法である。

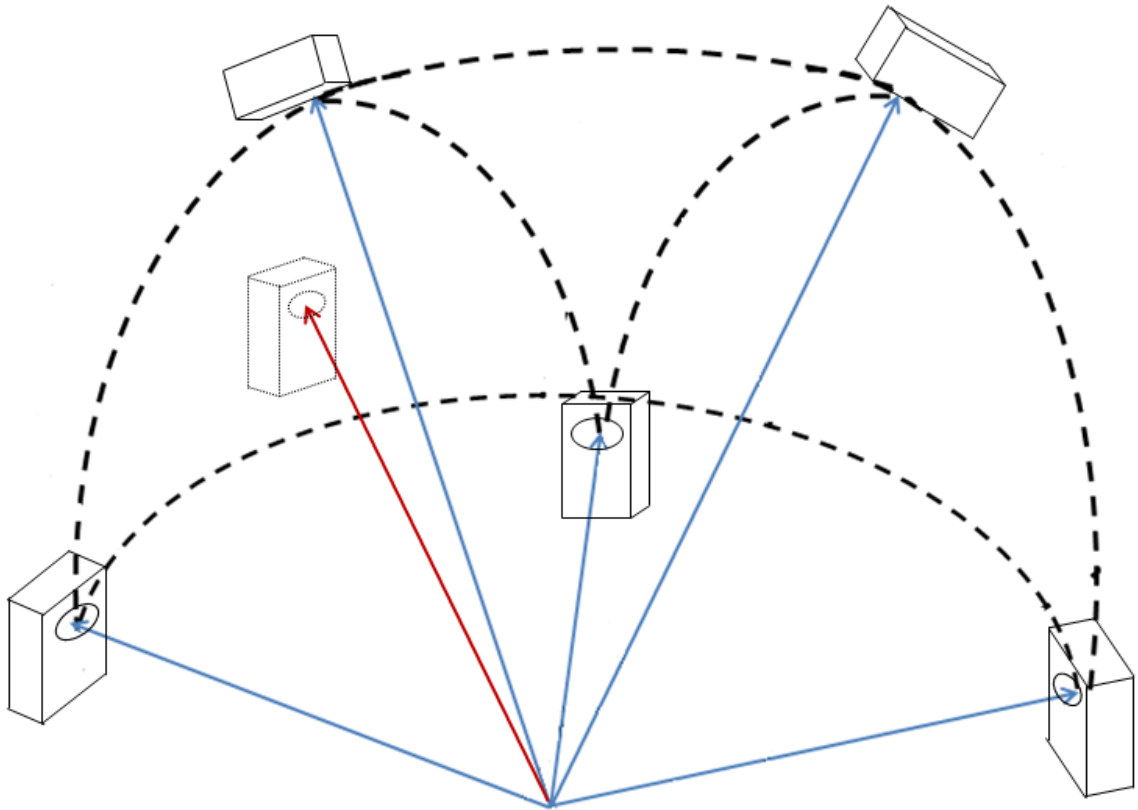


図 1 VBAP

## 2.2 二次元 VBAP

二次元 VBAP は、現在最もよく利用されているパニングの方法であり、家庭的にも専門的にも多くの場で適用されている。スピーカーを聴取者の両耳を含む水平面上に配置するものである。

図 2 に示すような二つのスピーカーを配置した場合を考える。二つのスピーカーは、聴取者正面に対して線対称、かつ、等距離に配置されている。二つのスピーカーが同位相の信号を発している時、二つのスピーカーの振幅を変化させると、聴取者は音像が二つのスピーカーの間にあると知覚する。音像の位置は、聴取者とスピーカーの距離関係、各スピーカーの信号の振幅によって決定される。スピーカーから出力される信号の振幅は、各スピーカーの `gain factor[1]` によって個々に制御される。

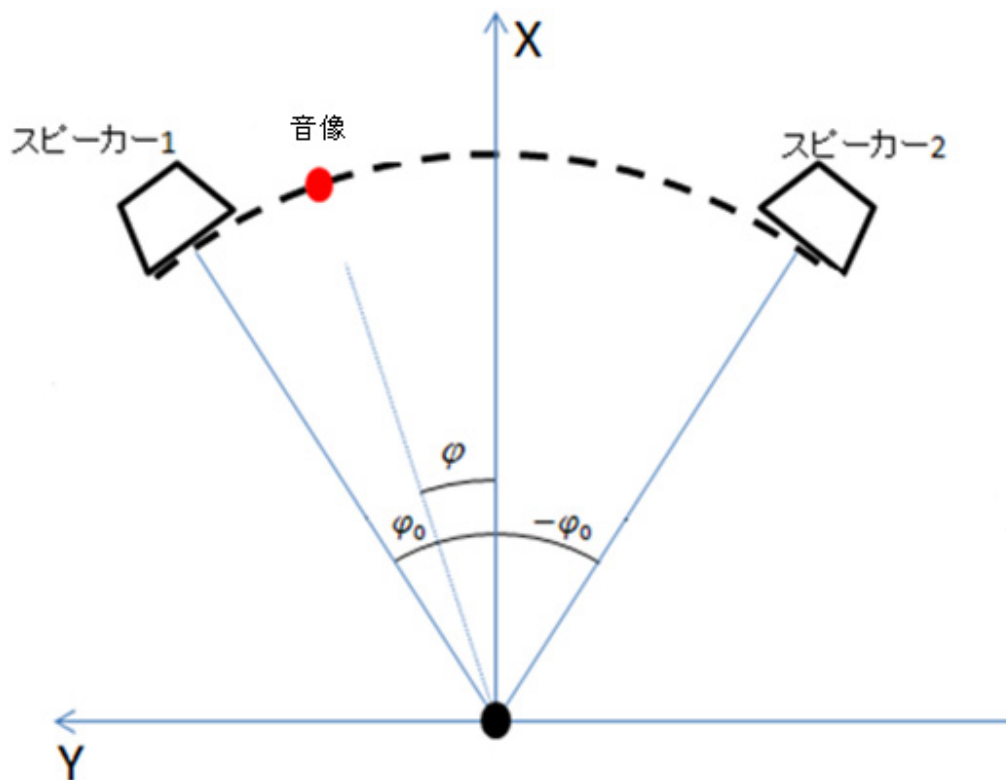


図 2 二次元 VBAP

音像の方向は、各スピーカーが出力している信号の振幅によって決定される。音の大きさを一定にしたまま、聴取者を中心とした円弧上に音像を定位させるための条件式は、(1)式で表される。

$$g_1^2 + g_2^2 = C \quad (1)$$

ここで、 $g_1$ 、 $g_2$  は各スピーカーの gain factor、 $C$  は定数である。 $C$  の値により円弧の半径を制御することが可能である。図 2 では、スピーカー1 の音量がスピーカー2 の音量より大きいため、音像がスピーカー1 に偏って定位している。

次に、音像を自由に定位させる理想的なパニング処理における gain factor の計算法について説明する。音像方向の知覚は、おおよそ Blumlein[2]が提案した立体音響の正弦の法則、(2)式に従っている。

$$\frac{\sin \varphi}{\sin \varphi_0} = \frac{g_1 - g_2}{g_1 + g_2} \quad (2)$$

ここで、 $0^\circ < \varphi_0 < 90^\circ$ 、 $-\varphi_0 \leq \varphi \leq \varphi_0$ 、 $g_1, g_2 \in [0, 1]$  とする。 $\varphi$  は X 軸と音像の間の角度で、 $\pm\varphi_0$  は X 軸とスピーカーの間の角度である。(2)式は、聴取者がまっすぐ前を向いている時に成り立つ。もし、聴取者が頭部を回転させる時は、(3)式がより正確になる。

$$\frac{\tan \varphi}{\tan \varphi_0} = \frac{g_1 - g_2}{g_1 + g_2} \quad (3)$$

ここで、 $0^\circ < \varphi_0 < 90^\circ$ 、 $-\varphi_0 \leq \varphi \leq \varphi_0$ 、 $g_1, g_2 \in [0, 1]$  とする。各スピーカーの音響出力を一定にした時、gain factor は(1)式と(2)式、または(1)式と(3)式と用いて計算することができる。(2)式と(3)式のわずかな違いは、聴取者の頭部回転に伴う音像のわずかな動きによるものである。しかし、この違いは、主観的な評価では無視できるほどの違いである。

### 2.3 三次元 VBAP

三次元 VBAP の場合も二次元 VBAP と同様に、音像の位置は、聴取者とスピーカ-の距離関係、各スピーカ-の信号の振幅によって決定される。音像は図 3 のように聴取者から見て三つのスピーカ-で囲まれた、三次元球体の表面上に定位する。各スピーカ-から出力される信号の振幅は、各スピーカ-の gain factor によって個々に制御される。音の大きさを一定にしたまま、スピーカ-間に定位させるための条件式は、(4)式で表される。

$$g_1^2 + g_2^2 + g_3^2 = C \quad (4)$$

ここで、 $g_1$ 、 $g_2$ 、 $g_3$  は各スピーカ-の gain factor、 $C$  は定数である。二次元 VBAP と同様に  $C$  の値により球体の半径を制御することが可能である。

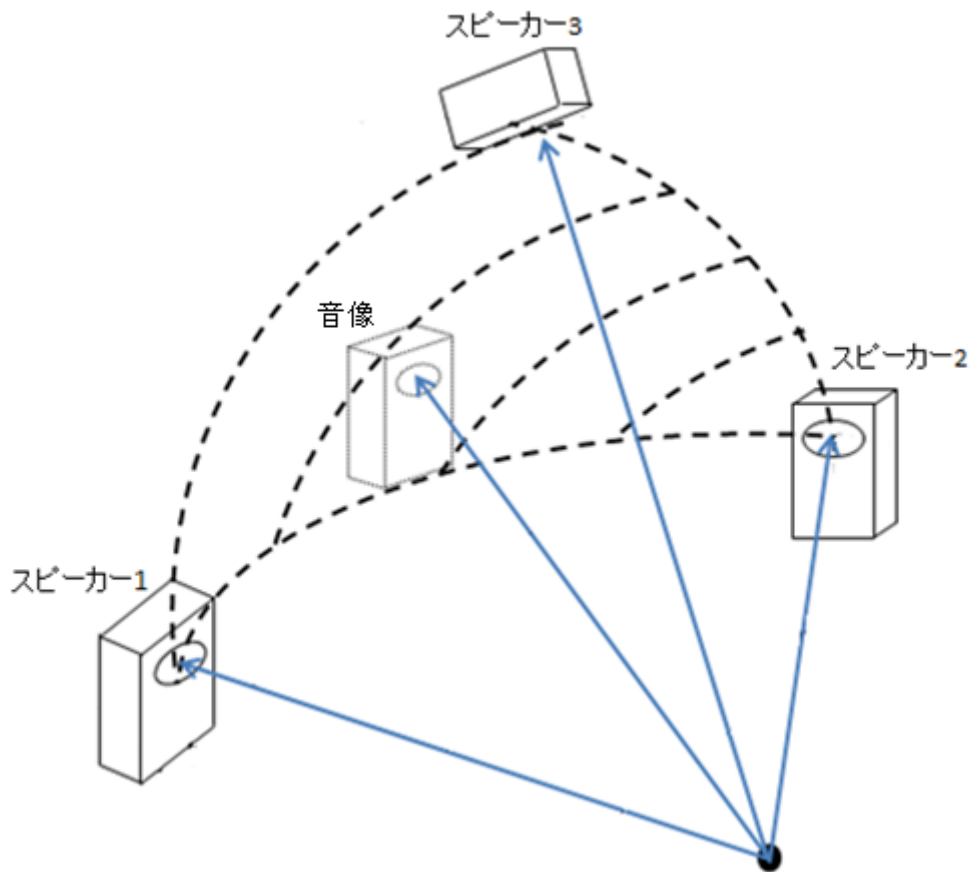


図 3 三次元 VBAP



図 4 のように、原点を聴取点とし、3 つのスピーカーが直交座標の軸上にある時、各スピーカーの固有の gain factor は、次式で表される。

$$g_x = C \cos \theta \cos \gamma \quad (5)$$

$$g_y = C \sin \theta \cos \gamma \quad (6)$$

$$g_z = C \sin \gamma \quad (7)$$

ここで、 $\gamma$  は仰角、 $\theta$  は方位角である。gain factor の計算は、球面座標と直交座標の座標変換に似ている。gain factor は、球面座標での  $(\gamma, \theta)$  方向の単位ベクトルの直交座標に定数を乗じたものである。

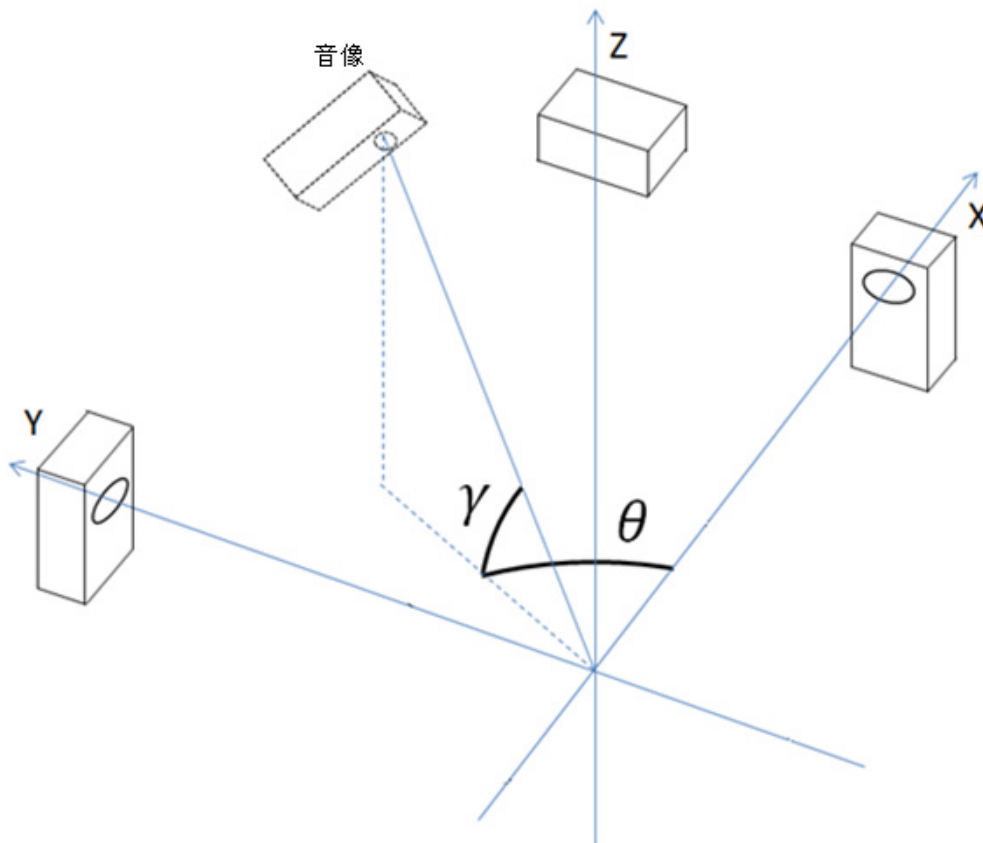


図 4

### 3 立体音響再生装置

#### 3.1 使用機材・ソフトウェア

##### 3.1.1 パワースピーカー



図 5 TIMEDOMAIN mini

本研究で用いたスピーカーは TIMEDOMAIN mini (図 5) であり、専用アンプを内蔵したパワースピーカーである。表 1 に製品概要を示す。

表 1 TIMEDOMAIN mini 製品概要[3]

使用スピーカー	5 cm フルレンジ
最大出力	4 W + 4 W (EIAJ 10%歪時)
入力インピーダンス	10 K $\Omega$
入力端子	ステレオミニプラグ × 1
電源	AC100V 50/60 Hz
外形寸法	106W × 185H × 152D mm
質量	左 600 g、右 680 g
付属品	AC アダプタ × 1

### 3.1.2 オーディオインターフェイス



図 6 M-AUDIO FireWire410

M-AUDIO FireWire410 (図 6)は WindowsPC からの個々のシグナルを、外部のミキサーの別々のチャンネルへ送信することが可能であり、サラウンドサウンドのコントロールなどに有効である。表 2 に製品概要を示す。

表 2 M-AUDIO FireWire410 製品概要[4]

周波数特性	20 Hz～40 Hz +/- 1dB (96 Hz 時)
S/N 比	107 dB
ダイナミックレンジ	108 dB
歪み率	0.00281%
サンプリングレート	44.1 Hz～192 Hz (ライン入出力) 44.1 kHz、48 kHz、88.2 kHz、96 kHz (デジタル入出力)
入出力感度	-10 dB アンバランス
背面アナログバランス入力	-10 dBv = 0.316 Vms
全面アナログバランス XLR 入力	+4 dBv = +4 dBu = 1.23 Vms
最大入力レベル	-3.3 dBu (PAD なし)、+16.7 dBu (PAD 併用時)
サイズ	23.5 cm (幅) × 17.8 cm (奥) × 4.8 cm (高)

### 3.1.3 再生ソフトウェア



図 7 CUBASE4[5]

CUBASE4（図 7）は、steinberg 社が開発した強力なオーディオ&MIDI レコーディング、洗練された編集機能、柔軟なミキシング機能、高品質のエフェクトを一体化されたミュージックプロダクションシステムである。表 3 に CUBASE4 の特徴を示す。

表 3 CUBASE4 特徴[5]

・オーディオ&MIDI のレコーディング、編集、ミキシング
・VST3 テクノロジー搭載
・32 bit 浮動小数点演算オーディオ・エンジン搭載
・VST SoundTM-ユニバーサル・サウンド・マネージャーの採用
・コントロールルームセクション搭載
・アウトボード&ハードウェア音源の完全統合
・5.1 サラウンド・サウンドの編集とエクスポート
・プロフェッショナル・スコア機能（楽譜作成と印刷）
・Steinberg、YAMAHA 製ハードウェアとの高度な統合
・クロスプラットフォーム：Windows&Mac OS X（ユニバーサルバイナリ）

### 3.2 開発したシステム

本研究で開発したシステムは、SketchUp[6]で形状を作成し、幾何音響計算（バックトレース法[7]）を行って得られた情報をMATLAB[8]で処理し、CUBASE4に取り込み、三次元VBAPに基づく立体音響再生装置で再生するものである。開発したシステムの簡略図を図8に示す。

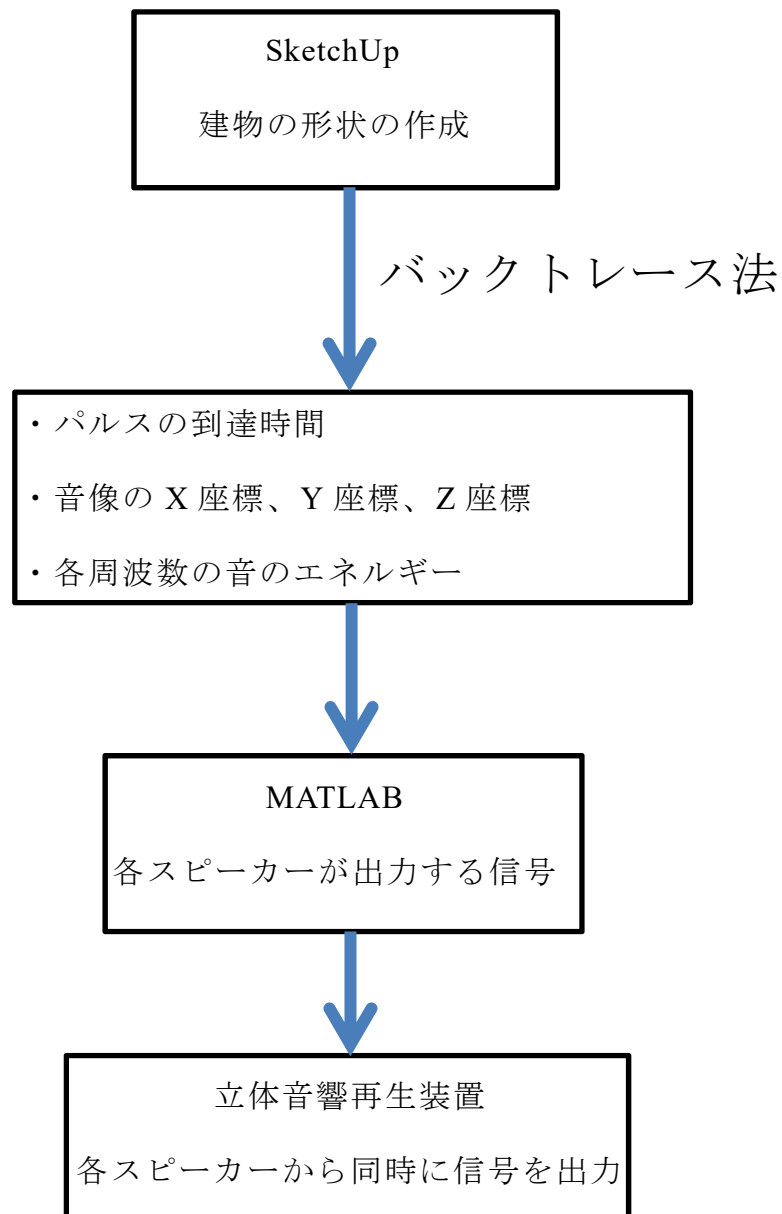


図8 開発したシステムの簡略図

本研究で開発した立体音響再生装置は、真下を除く直交座標軸上にスピーカーを5つ、等距離に配置したものである。図9、図10のように、スピーカーを配置し各スピーカーに番号を与える。

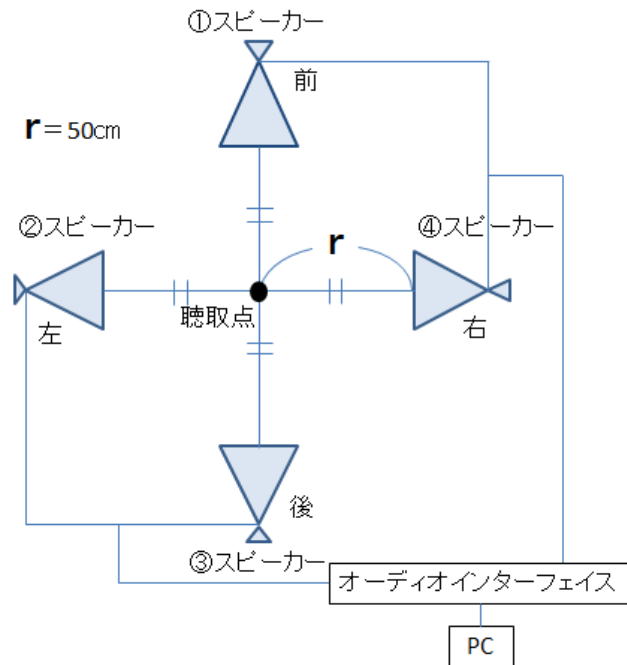


図9 上から見た立体音響再生装置の図

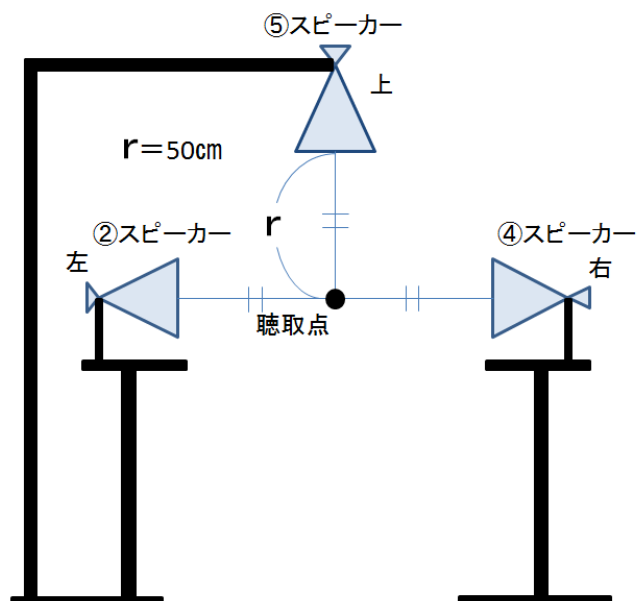


図10 横から見た立体音響再生装置の図

まず、SketchUp で音場予測をするモデルの形状を描く。このデータを dxf ファイルで保存し、バックトレース法によって音場計算を行う。これにより、音の到達時間、音像の X 座標、Y 座標、Z 座標、各周波数の音のエネルギーのデータが得られる。図 11 は後述する聴感評価実験で用いた SketchUp で描いたボストンシンフォニーホールモデルである。

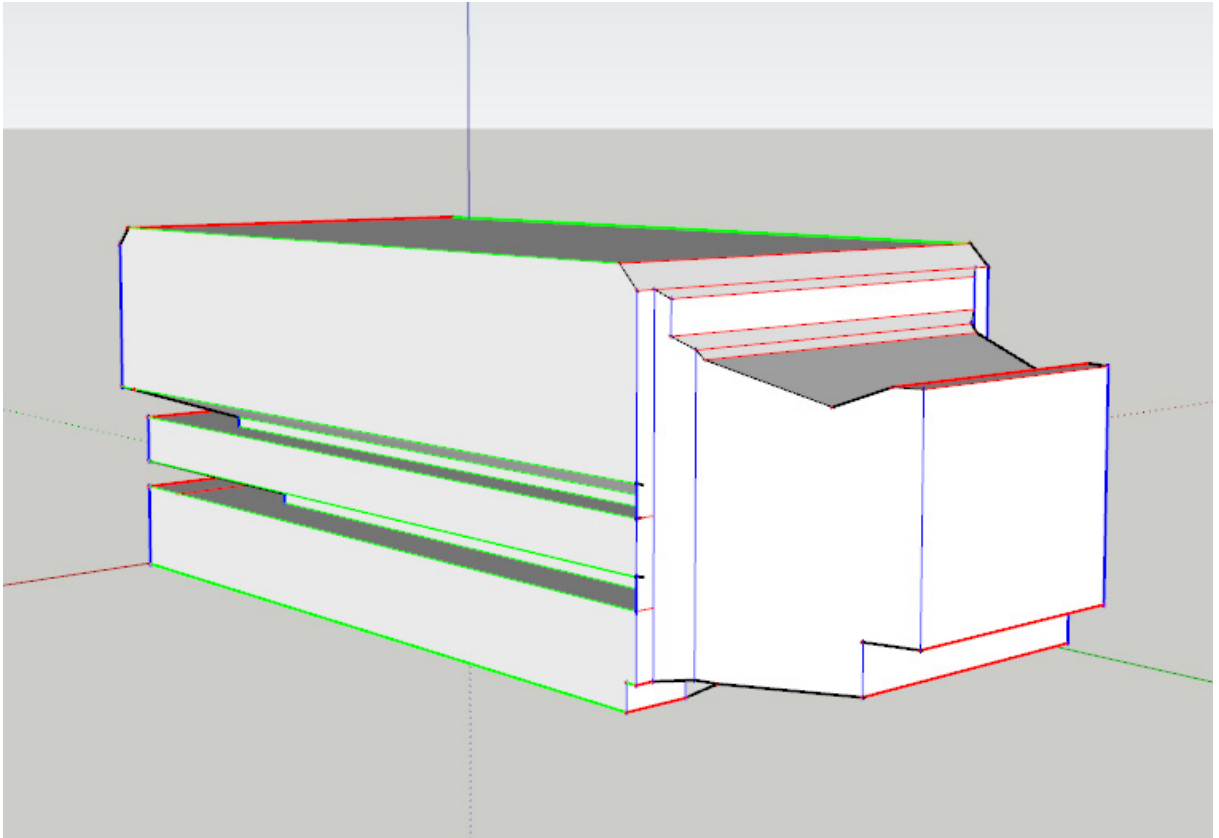


図 11 SketchUp で描いたボストンシンフォニーホール



次に、バックトレース法によって得られたパルスの到達時間、音像の X 座標、Y 座標、Z 座標、各周波数の音のエネルギーのデータを用いて、MATLAB で各スピーカーが出力する信号を求める。音像が第何象限にあるかによって場合分けを行い、その音像を出力する三つのスピーカーを選択する。例えば、図 12 に示すような場合を考える。図 12 では、音像が第一象限にある場合のため、①、④、⑤のスピーカーから音出力されることになる。開発したシステムでは、直交座標軸上にスピーカーを配置しているため、①、④、⑤のスピーカーの音圧比は、それぞれ Y 座標、X 座標、Z 座標の値と等しくなる。よって、パルスの到達時間にそれぞれのスピーカーが出力する信号は、音像の座標値に各周波数の音のエネルギーをかけたものになる。この処理を到達するすべてのパルスについて行い、それらをすべて時間軸上で足し合わせることで各スピーカーが出力すべきインパルス応答を求め、そこにドライソースを畳み込み、最終的に各スピーカーが出力する信号を求める。

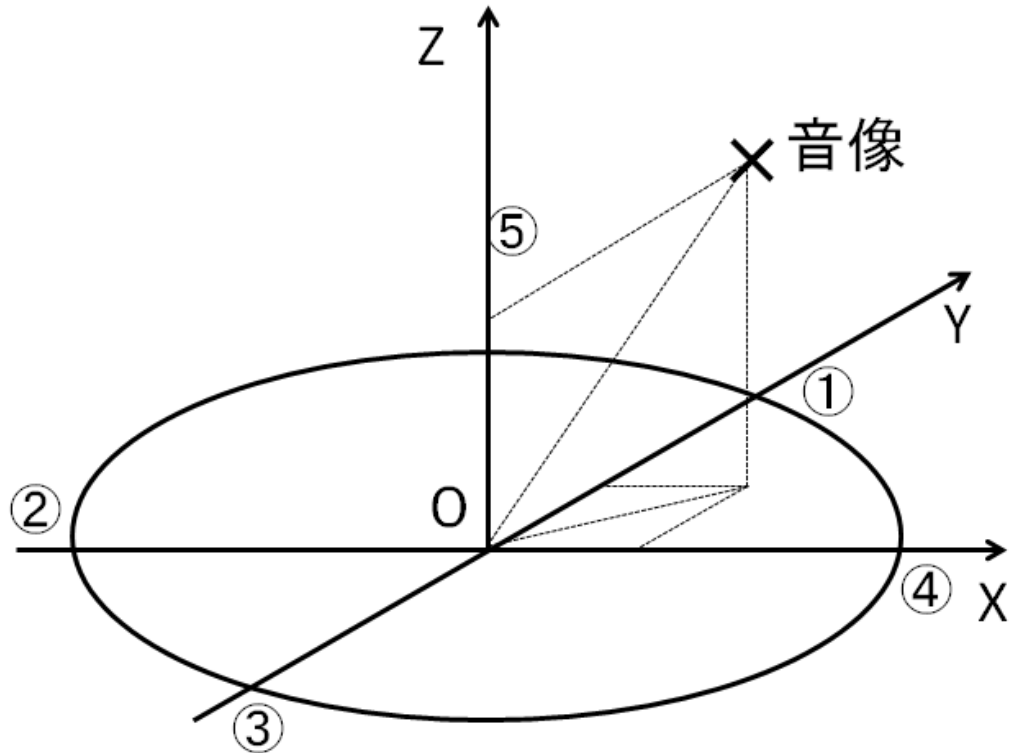


図 12

各スピーカーの信号を、Cubase4に取り込み、5つのスピーカーから同時に音を再生する。

写真1は、開発した立体音響再生装置である。

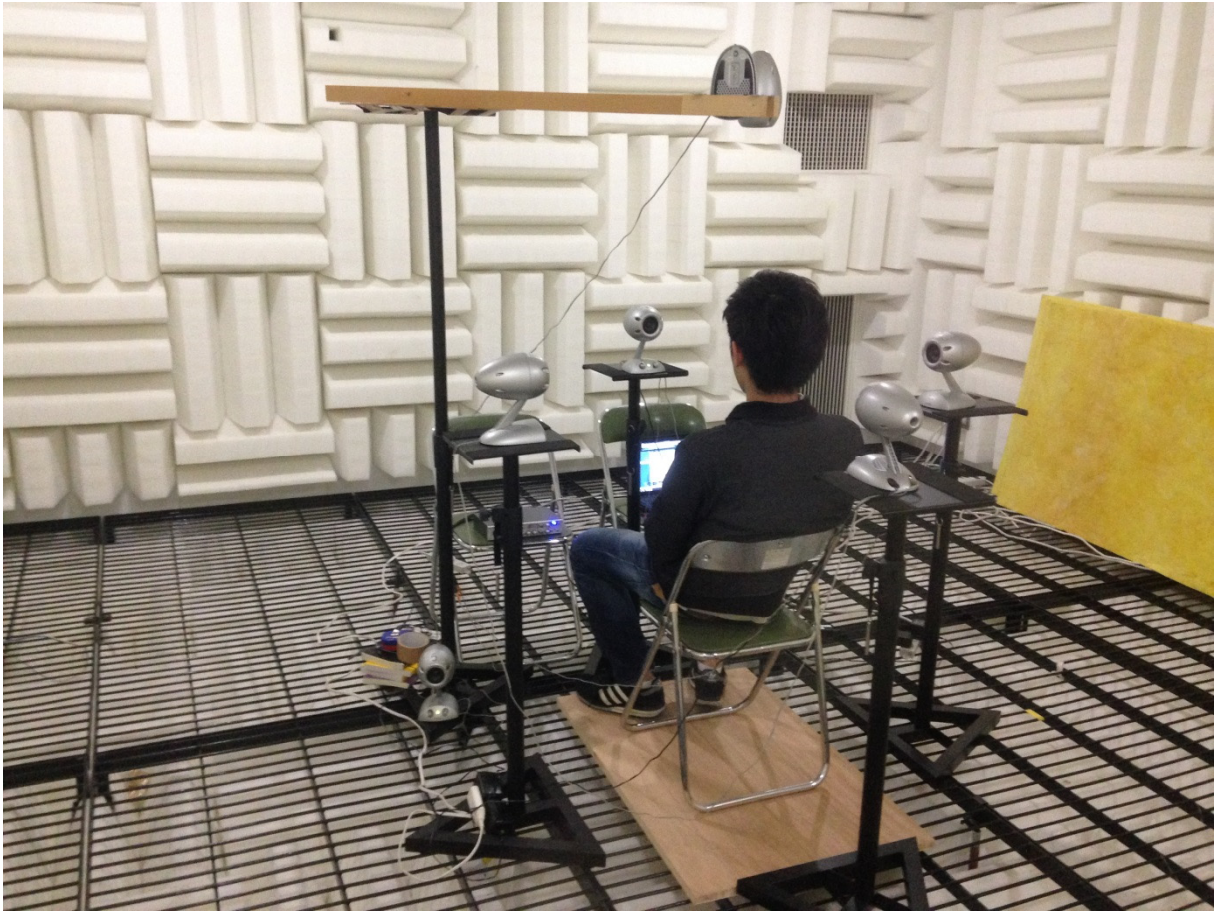


写真1 立体音響再生装置

## 4 聴感評価実験

### 4.1 実験方法

開発したシステムの再現性を確かめるために、聴感評価実験を行った。開発したシステム用に六つの建物内で音楽が演奏されていることを想定した音源を前章の処理に基づいて作成した。ドライソースにはすべて同じ約 20 秒間の楽曲を用いた。正常な聴力を持つ 20 歳代の男女 6 人に、無響室内に設置した本研究で提案するシステムにより音を呈示し、それぞれについて主観的な評価をさせた。六つの建物のモデルを図 13、図 14、図 15、図 16、図 17、図 18 に示す。

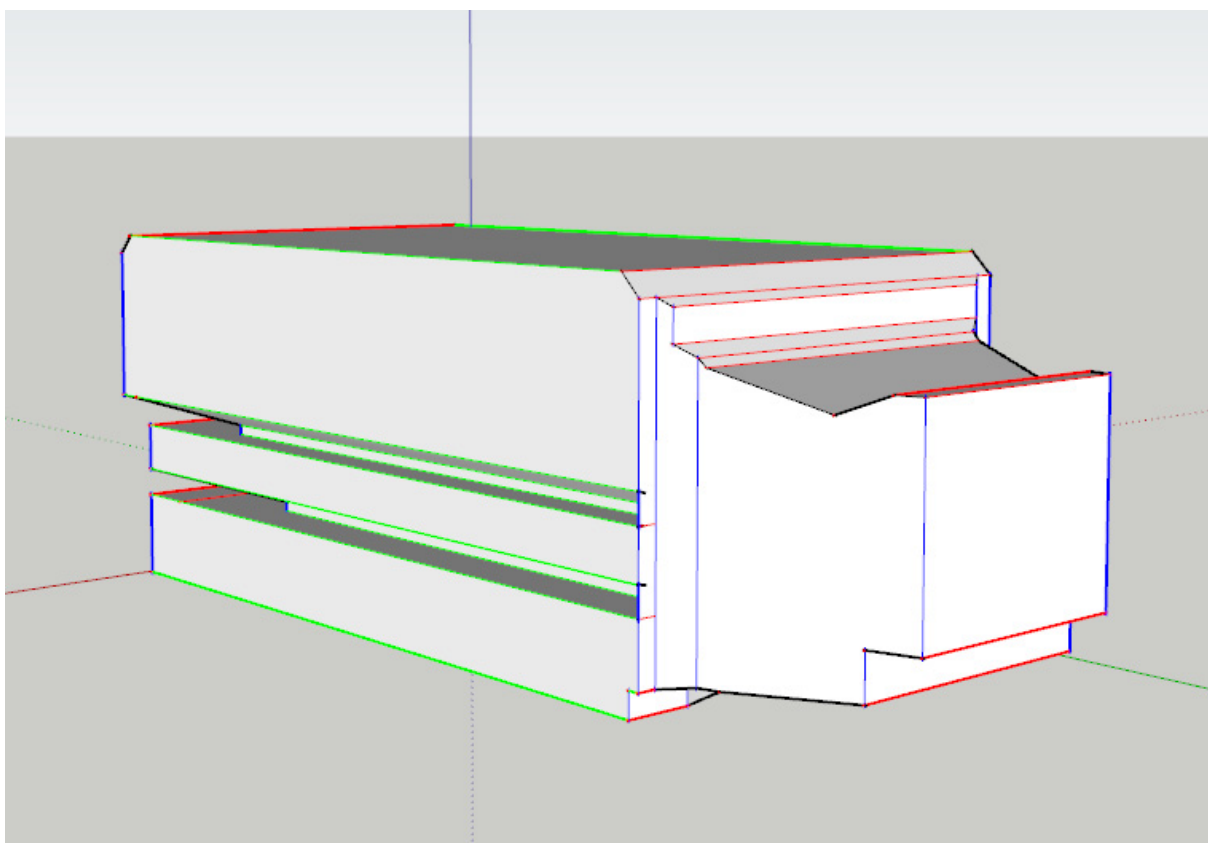


図 13 シンフォニーホールモデル

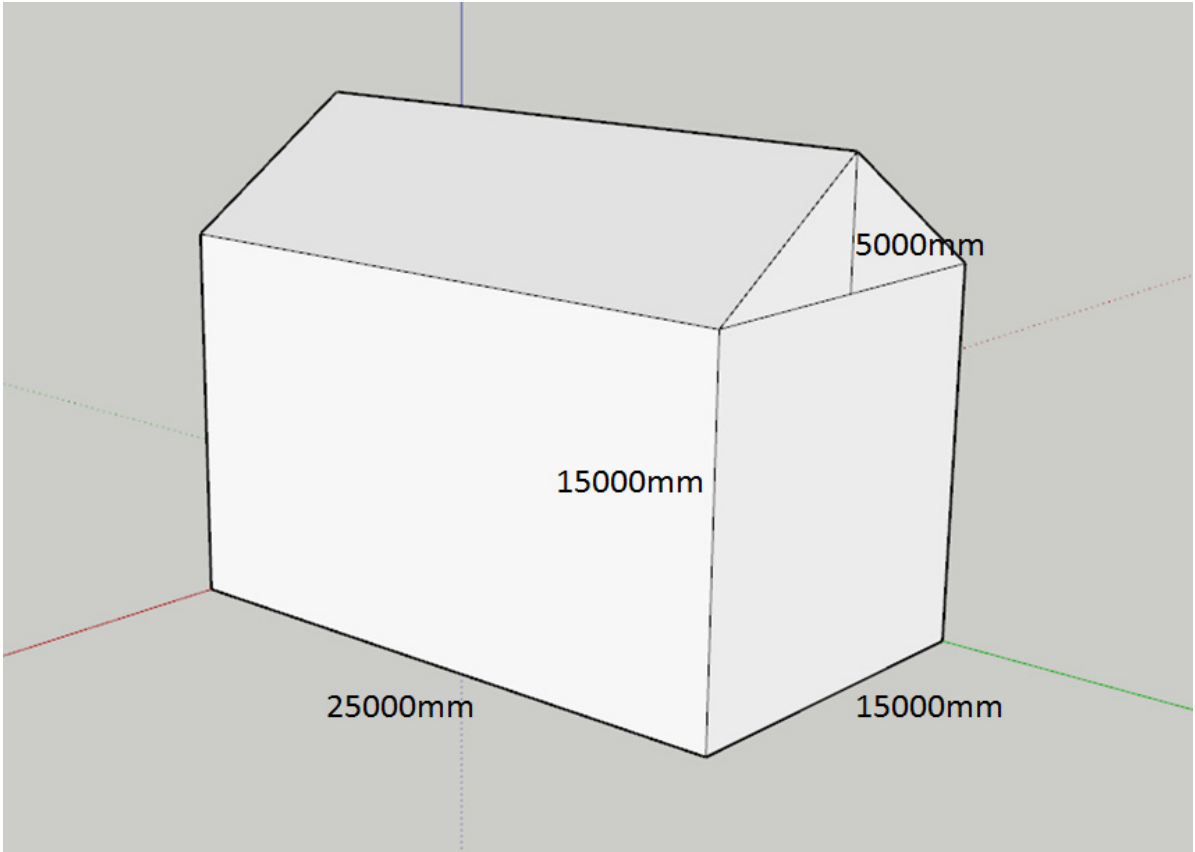


図 14 教会のモデル（全壁面吸音率 0.01）

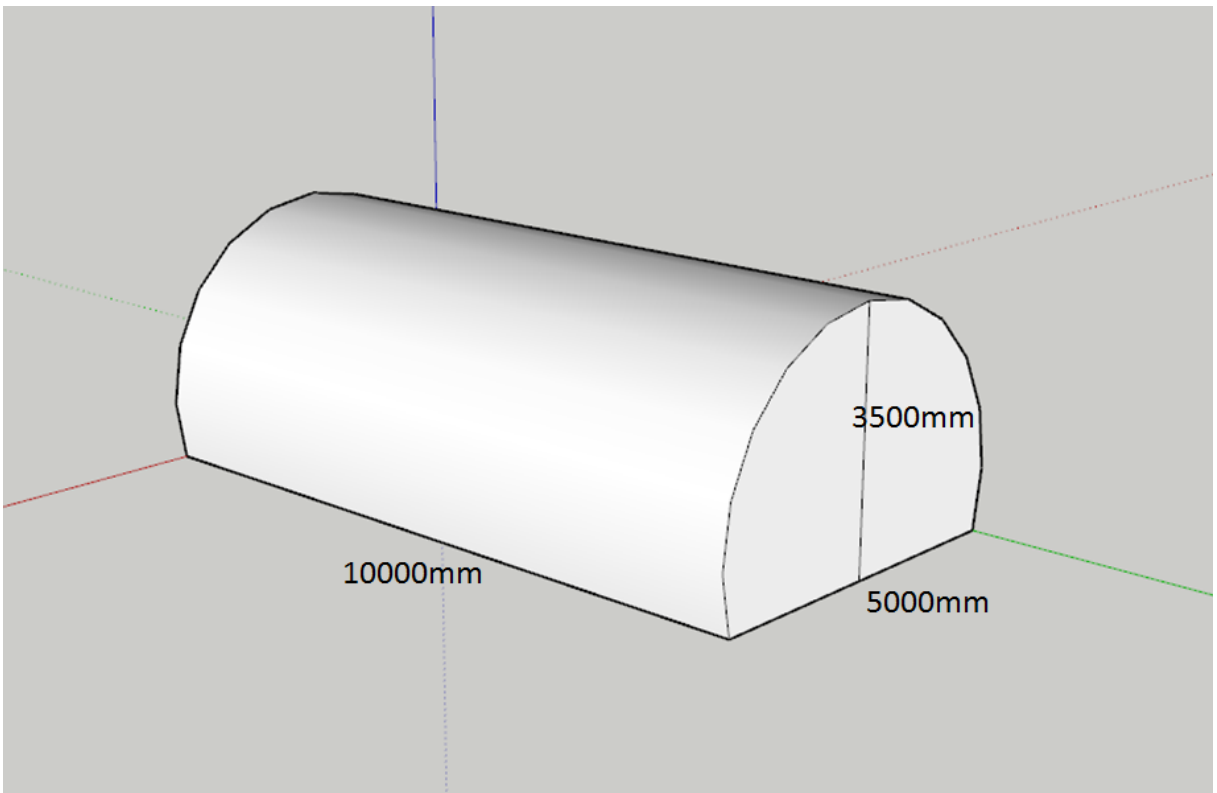


図 15 トンネルのモデル（全壁面吸音率 0.00）

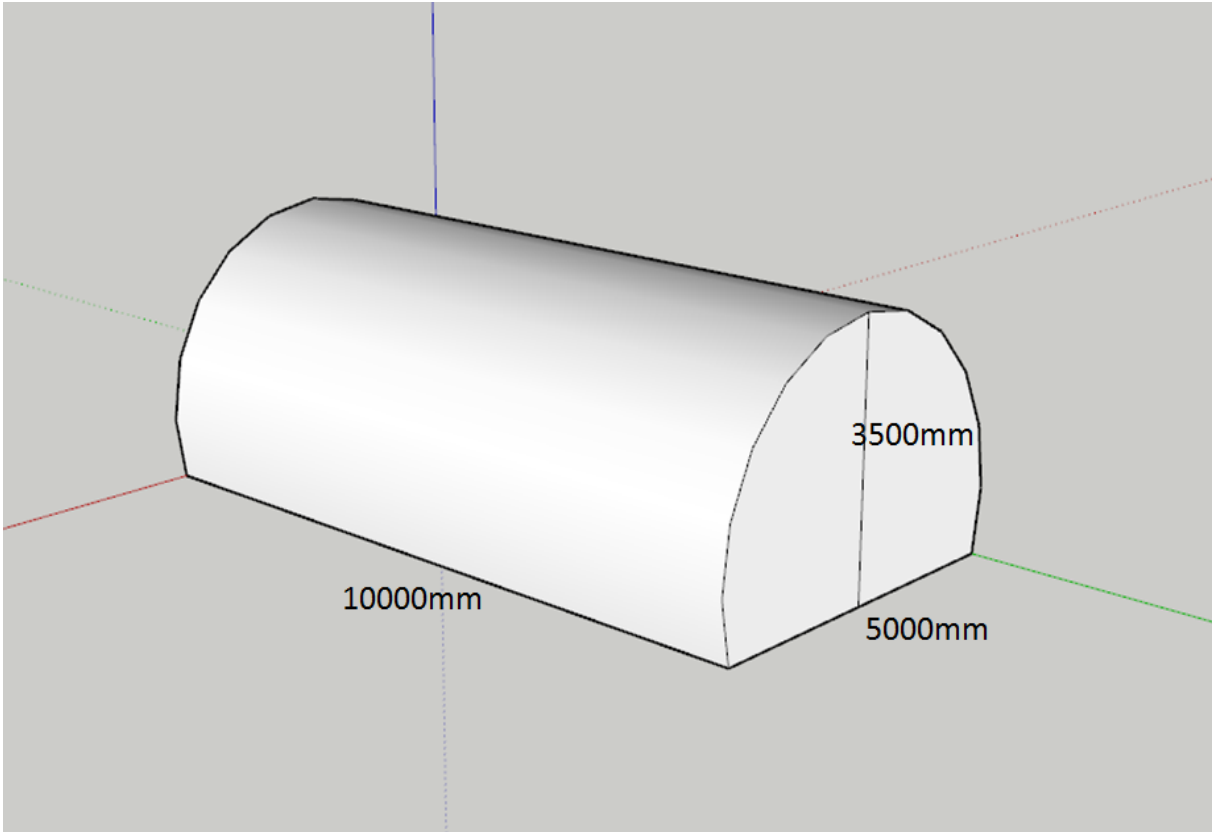


図 16 トンネルのモデル (全壁面吸音率 0.02)

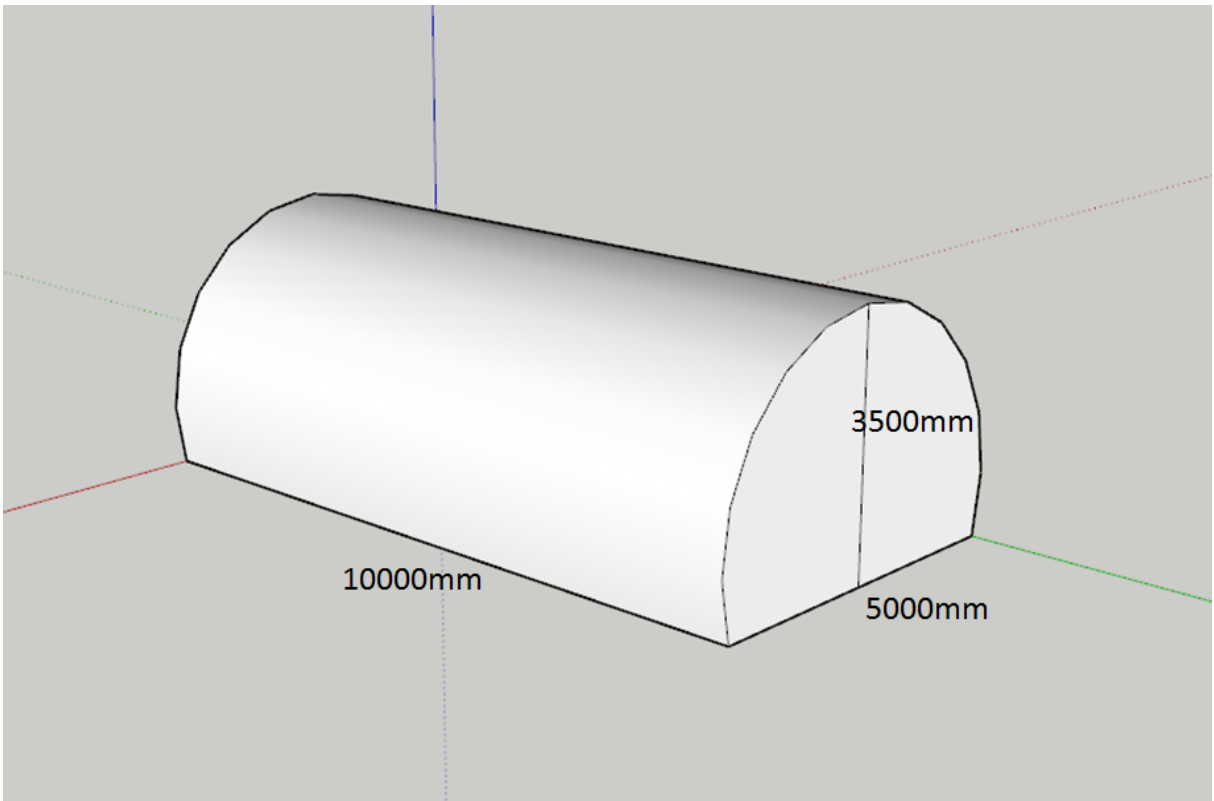


図 17 トンネルのモデル (全壁面吸音率 0.10)

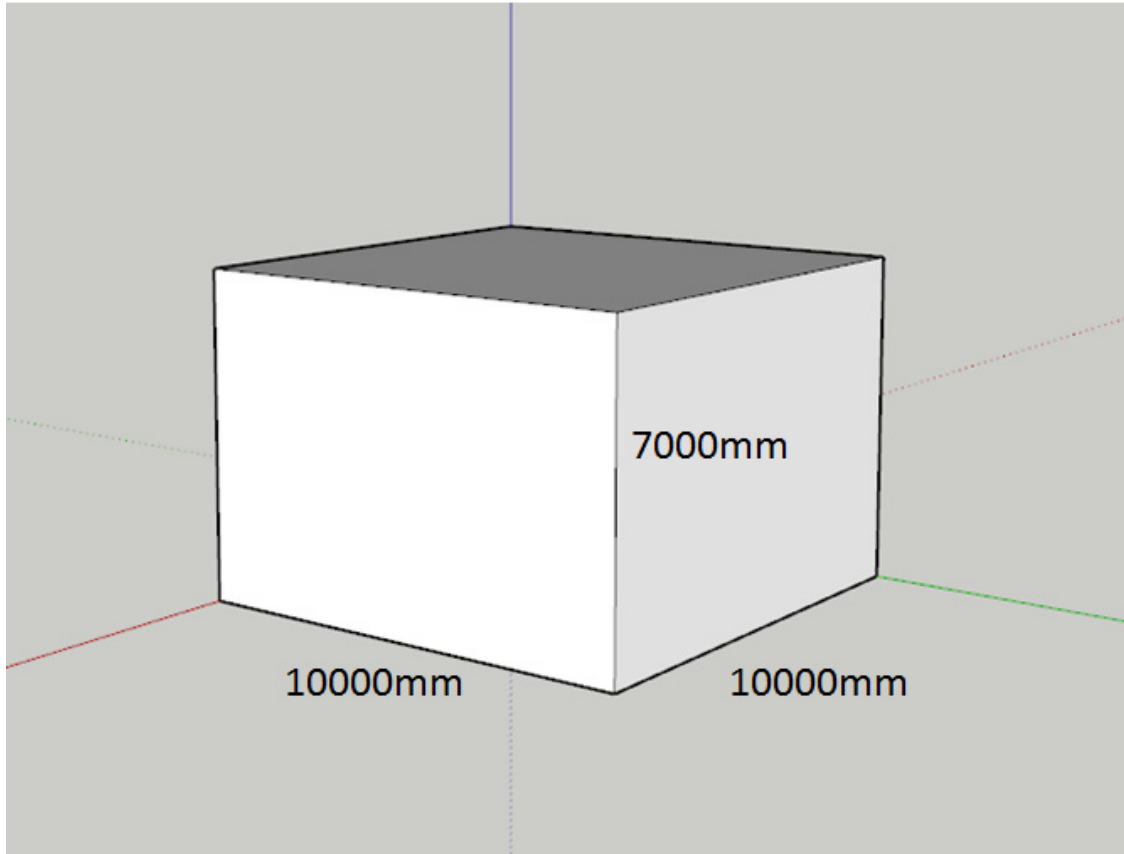


図 17 無響室のモデル（全壁面吸音率 1.00）

実験時の被験者への教示を以下に示す。

今から、六つの音を聞いてもらいます。頭部運動させず、正面を向いて聞いてください。六つの音は、それぞれある形状の建物内で音楽が演奏されていることを想定したものになります。すべて同じ音源となっており、約 20 秒間です。それぞれの音について、臨場感、残響感、音に包まれた感、音質、明瞭性について五段階の評価をしてもらいます。なお、六つの音は何度でも聞くことができます。それぞれの評価項目について簡単に説明します。臨場感は、それぞれの音を呈示する前に、どのような建物を想定した音なのかを伝えますので、その場にいるように感じられたか評価してください。残響感は、音がどれだけ響いていたかを評価してください。音に包まれた感は、音に包まれている感じがしたかを評価してください。音質は、音質が良かったか悪かったかを評価してください。明瞭性は、音をはっきり聞き取れたかを評価してください。

## 4.2 評価方法

評価方法として、5段階評定尺度法を用いた。項目は、臨場感、残響感、音に包まれた感、音質、明瞭性の五つである。実験に使った評価用紙を図18に示す。これにより得られたデータを用いて、二元配置分散分析を行った。

聴感評価実験						
音を聞いて、以下の項目にお答えください。5段階評価で○印を記入してください。						
	と と も	や や	普 通	や や	と と も	
臨場感があった	-		-		-	臨場感がなかった
残響感があった	-		-		-	残響感がなかった
音に包まれていた	-		-		-	音に包まれていなかった
音質が良かった	-		-		-	音質が悪かった
はっきり聞き取れた	-		-		-	はっきり聞き取れなかった

図18 評価用紙

### 4.3 結果・考察

実験結果を図 19、図 20、図 21、図 22、図 23 に示す。

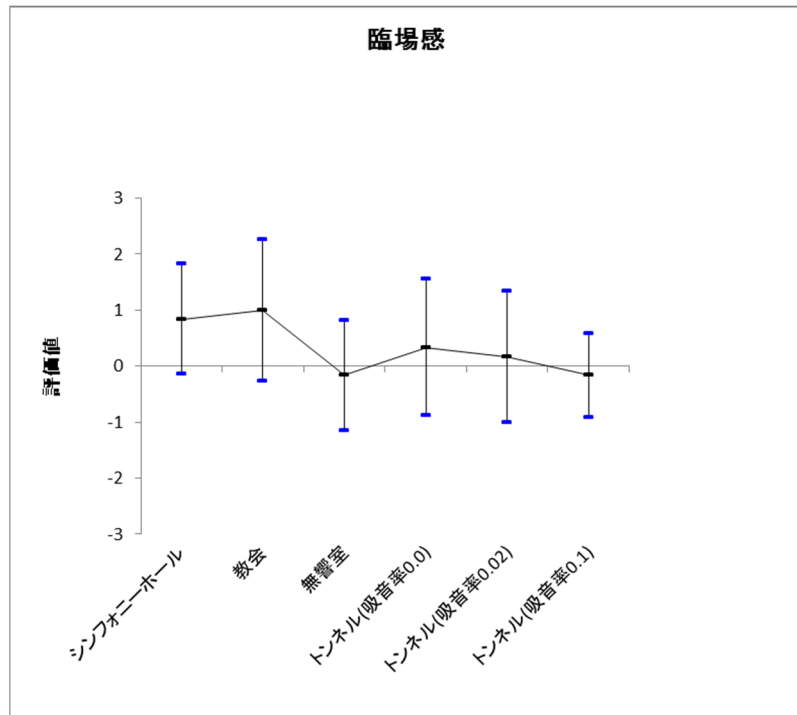


図 19 臨場感

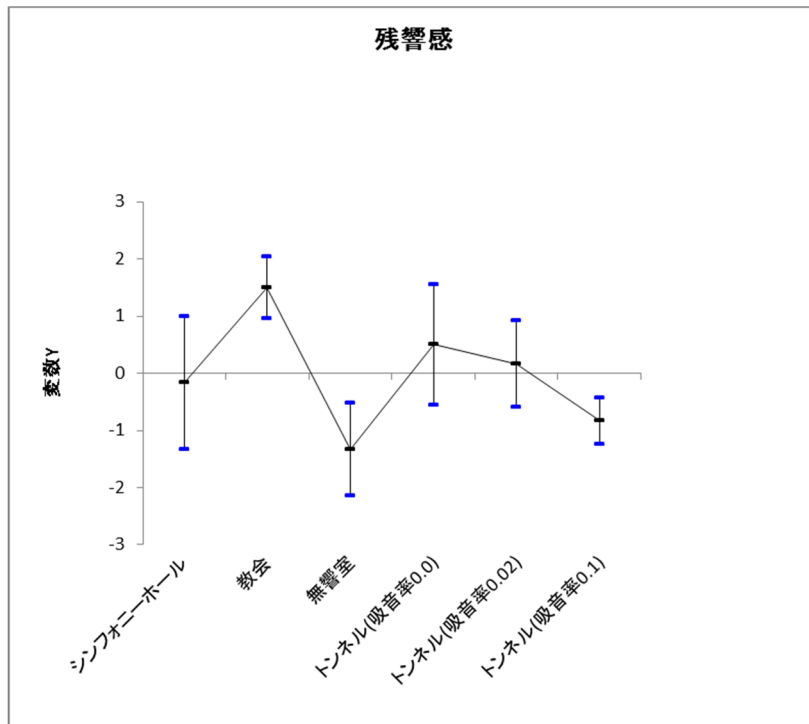


図 20 残響感



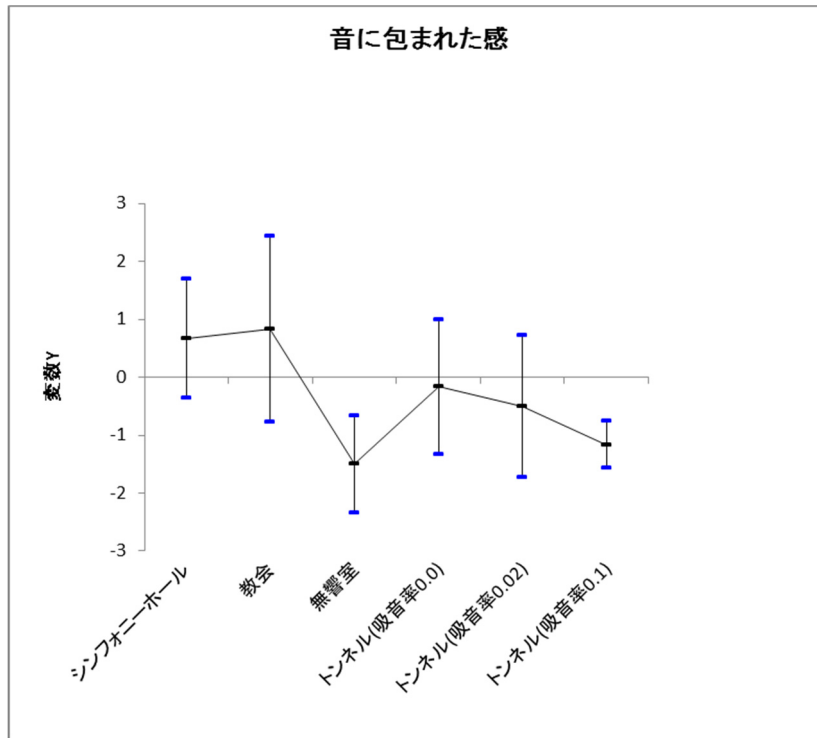


図 21 音に包まれた感

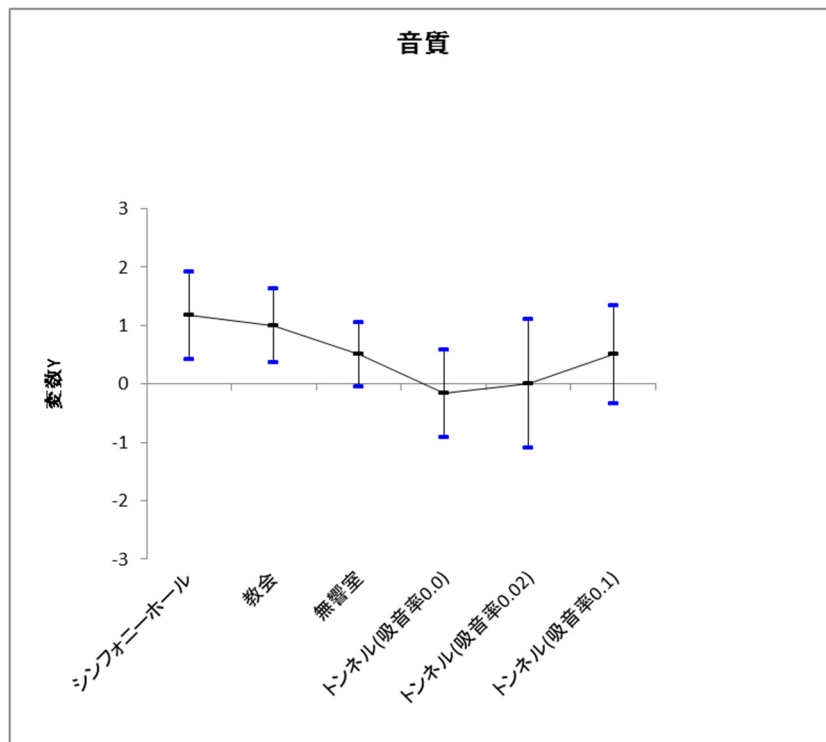


図 22 音質

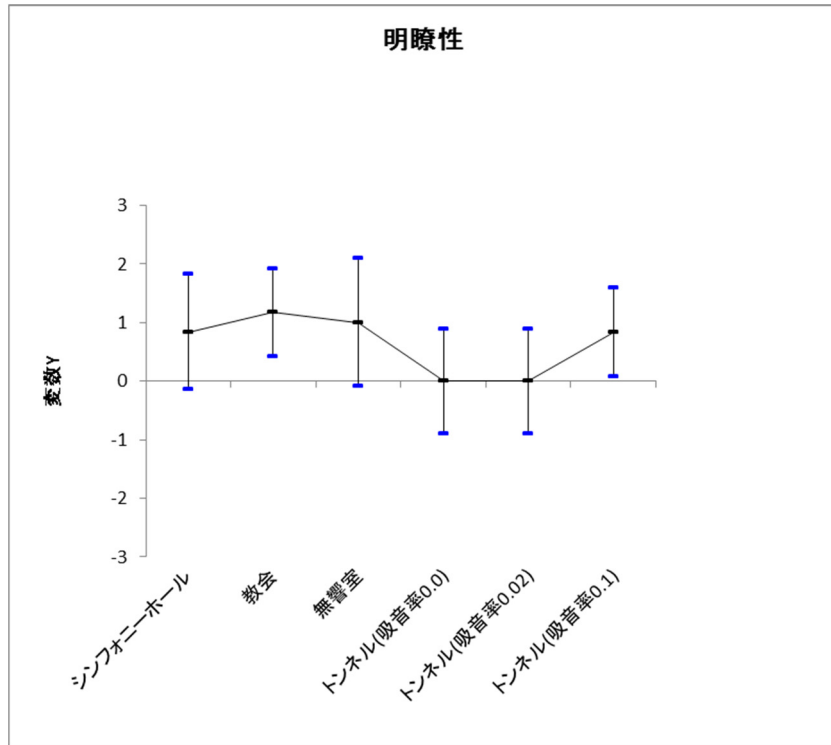


図 23 明瞭性

臨場感は、いずれの建物間にも有意な差がないという結果であった。臨場感は、音を聞いてその場にいるように感じられたかを評価させたが、評価値が概ね正の値であることから、被験者はいずれの建物でも同程度にある程度の臨場感を感じることができたと考えられる。残響感は、シンフォニーホールと教会、教会と無響室、教会とトンネル（全壁面吸音率 0.10）、無響室とトンネル（全壁面吸音率 0.00）、無響室とトンネル（全壁面吸音率 0.02）のそれぞれの間に有意水準 5%以下で有意な差が見られた。意図した立体的な音響が再現できていると考えられる。音に包まれた感は、シンフォニーホールと無響室、シンフォニーホールとトンネル（全壁面吸音率 0.10）、教会と無響室、教会とトンネル（全壁面吸音率 0.10）の間に有意水準 5%以下の有意な差が見られたので、意図した立体的な音響が再現できていると考えられる。音質は、いずれの建物間にも有意な差がないという結果であった。これは、再生装置、特にスピーカーの性能によって評価がなされたため、建物間での差が感じられなかったと考えられる。明瞭性は、いずれの建物間にも有意な差がないという結果であった。壁や床、天井の吸音率が高いほど残響時間が短くなり、反射音が弱く

なるため明瞭性は良くなるが、トンネル（全壁面吸音率 0.00）やトンネル（全壁面吸音率 0.02）と、無響室であっても有意な差が見られなかった。しかしながら、残響感ではトンネル（全壁面吸音率 0.00）と無響室、トンネル（全壁面吸音率 0.02）と無響室で有意な差が見られている。このことから、呈示した音のドライソースが音楽であったため、被験者が明瞭性について評価することが困難であったと考えられる。

## 5 総括

今回、設計段階で空間の音場を仮想的に再現できる、低コストで簡易な三次元音場再現システムの開発を試みた。低コストで簡易なシステムを作るという点は達成できたが、聴感評価実験の結果から、再現性が低く、室内音響設計に利用するという点は達成できなかった。次の課題として、できる限り低コストで簡易なシステムではあるが、室内音響設計に利用できる程度の再現性をもったシステムの開発を目指すことが挙げられる。

## 参考文献

- [1] V. Pulkki,“Virtual sound source positioning using vector base amplitude panning”,Journal of the Audio Engineering Society 45(6), pp. 456-466, 1997.
- [2] A. D. Blumlein, U.K. patent 394,325,1931. Reprinted in Stereophonic Techniques (Audio Engineering Society, New York, 1986).
- [3] <http://www.timedomain.co.jp/product/mini.html>, 2017/01/26.
- [4] <http://www.m-audio.jp/>, 2017/01/31.
- [5] [https://japan.steinberg.net/jp/products/legacy\\_products/cubase\\_4.html](https://japan.steinberg.net/jp/products/legacy_products/cubase_4.html), 2017/01/26.
- [6] <http://www.sketchup.com/ja>, 2017/02/07
- [7] Michael 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), pp. 172-178, 1989.
- [8] <https://jp.mathworks.com/products/matlab.html>, 2017/02/07