

令和2年度 卒業論文

簡易立体音響装置の制作と聴感性能評価

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

学籍番号 建17-0070

氏名 西村 洸志郎

指導教員 豊田 政弘

目次

1	はじめに	4
1.1	研究背景	4
1.2	研究目的	5
2	再現方法	6
2.1	VBAP	6
2.1.1	VBAP とは	6
2.1.2	二次元 VBAP	7
2.1.3	三次元 VBAP	9
2.2	バックトレース	11
2.2.1	幾何学音響理論	11
2.2.2	音線法	11
2.2.3	虚像法	11
2.2.4	バックトレース法	12
3	立体音響再生装置	13
3.1	使用した機材・ソフトウェア	13
3.1.1	アクティブスピーカー	13
3.1.2	オーディオインターフェイス	14

3.1.3 再生ソフトウェア	15
3.2 製作したシステム	16
3.3 立体音響装置	17
3.4 再生方法	18
4 聴感性能評価実験	20
4.1 実験方法	20
4.2 評価方法	25
4.3 結果・考察	26
5 総括	30
参考文献	

1 はじめに

1.1 研究背景

立体音響装置とは3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ことのできる装置である。現在では、VR音響や映画館など音環境を忠実に再現することが重要とされる空間において利用されている。

コンサートホールなど、音環境が意識して設計される施設は建設前の設計段階で事前に室形状や残響時間などの音響的処置を検討しておく必要がある。その際に対象の空間における音場を立体的に再現することができれば、設計意図通りの音響空間が形成できているか、実際に人の耳で聴覚的に確認することが可能となる。

しかし、現在実用されている立体音響装置は多くのスピーカーと広い空間を必要とし、高いコストがかかってしまう。

1.2 研究目的

本研究では、前述で述べた高い設計費用と、設置するための広い空間が必要とされる問題を解決するべく、5つのスピーカーで簡易的に立体音響を再現することのできるシステムの開発を目的とする。

2 再現方法

2.1 VBAP(Vector-Based Amplitude Panning)

2.1.1 VBAP とは

VBAP[1]とは三次元音場再生手法の一つであり、前述で述べた複数のスピーカーの音量差により任意の位置に音像を定位させるものである。図1のように聴取者から等距離にスピーカーを配置し、スピーカーで囲まれた領域内のあらゆる場所への音像の定位が可能である。

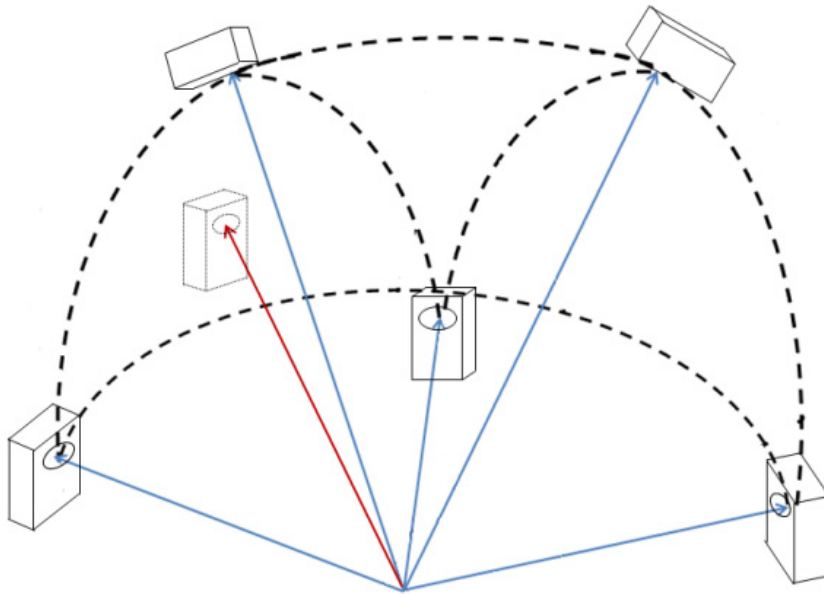


図1 VBAP

2.1.2 二次元 VBAP

二次元 VBAP は現在最も利用されている立体音響再生手法であり、家庭用の小規模のものから専門的なものまで多くの範囲で利用されている。

図 2 に示すように聴取者から等距離かつ線対称に 2 つのスピーカーを配置した場合を考える。2 つのスピーカーが同位相の信号を発している場合、聴取者は音像が 2 つのスピーカーの中心にあると知覚する。2 つのスピーカーの出力を変化させることで音像の位置を 2 つのスピーカーの成す弧の任意の位置に定位させることが可能となる。定位される音像の位置は、各スピーカーの gain factor[1]によって制御される。

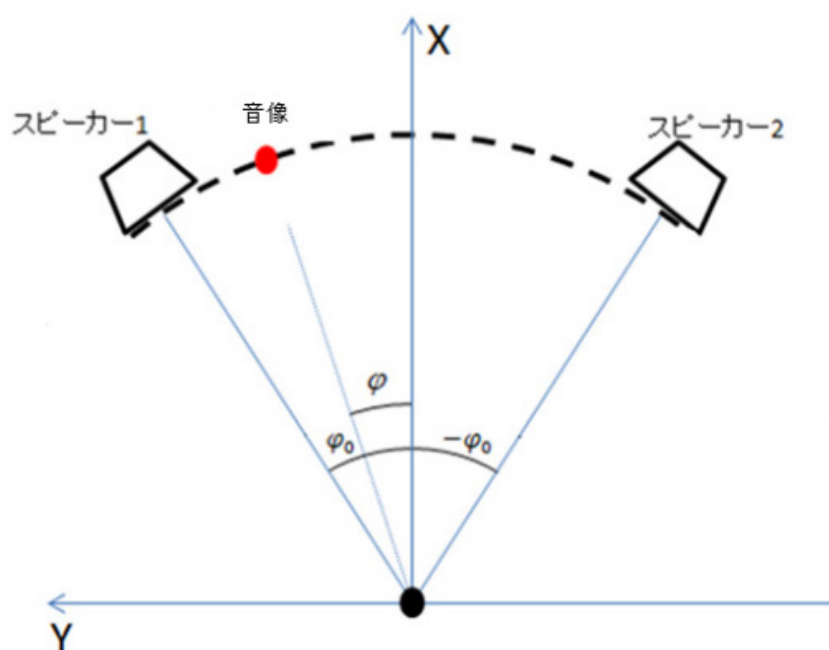


図 2 二次元 VBAP

音像の方向は、各スピーカーの出力する信号の振幅の関係により決定される。音の大きさを一定に保ちつつ、聴取者を中心とした2つのスピーカーの成す円弧上に音像を定位させるための条件は次式で表される。[2]

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

ここで、 g_1, g_2 を各スピーカーの gain factor と呼び、 C は円弧の半径を決定する定数である。図2では、スピーカー1の振幅がスピーカー2の振幅より大きいため、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 の計算方法について説明する。聴取者が知覚する音像の方向は、次式の立体音響の正弦の法則に従う。

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

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。 φ はX軸と音像が聴取者からの成す角度である。(2)式は、聴取者がX軸方向をまっすぐ向いている場合に成り立つ。聴取者が頭部を回転させる場合は(3)式がより正確となる。

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

音響出力レベルを一定に保った場合、(1)式と(2)式または、(1)式と(3)式を用いることにより gain factor を算出できる。(2)式と(3)式のわずかな違いは聴取者の頭部の回転による音像の移動により生ずるが、主観的な評価の際には無視できる程度のものである。

2.1.3 3次元 VBAP

前述の2次元 VBAP に3つ目のスピーカーを加え他の2つのスピーカーと同様に聴取者から等間隔に配置することにより、音場を3次元方向に定位させ3次元 VBAP の再現が可能となる。その際既存の2つのスピーカーと聴取者によって作られる平面上に3つ目のスピーカーを配置してはならない。

音像は図3のように聴取者からみた3つのスピーカーにより囲まれた球の表面上に定位する。2次元 VBAP と同様に各スピーカーの gain factor により音像の位置は決定され、音の大きさを一定に保ちつつ音像を定位させる条件は、次式で表される。

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

ここで、 g_1 、 g_2 、 g_3 は各スピーカーの gain factor であり、 C は球面の半径を決定する定数である。

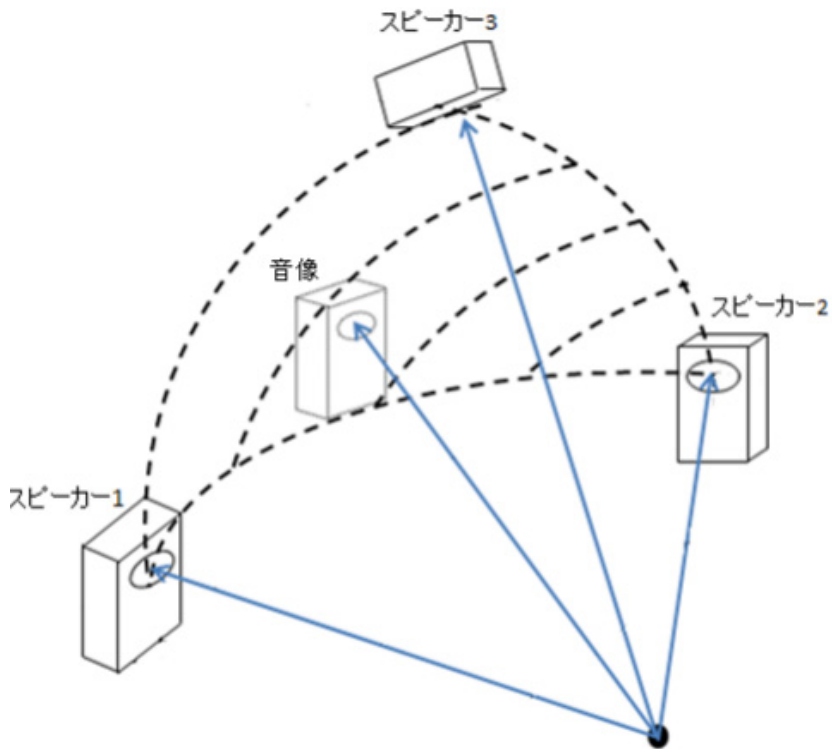


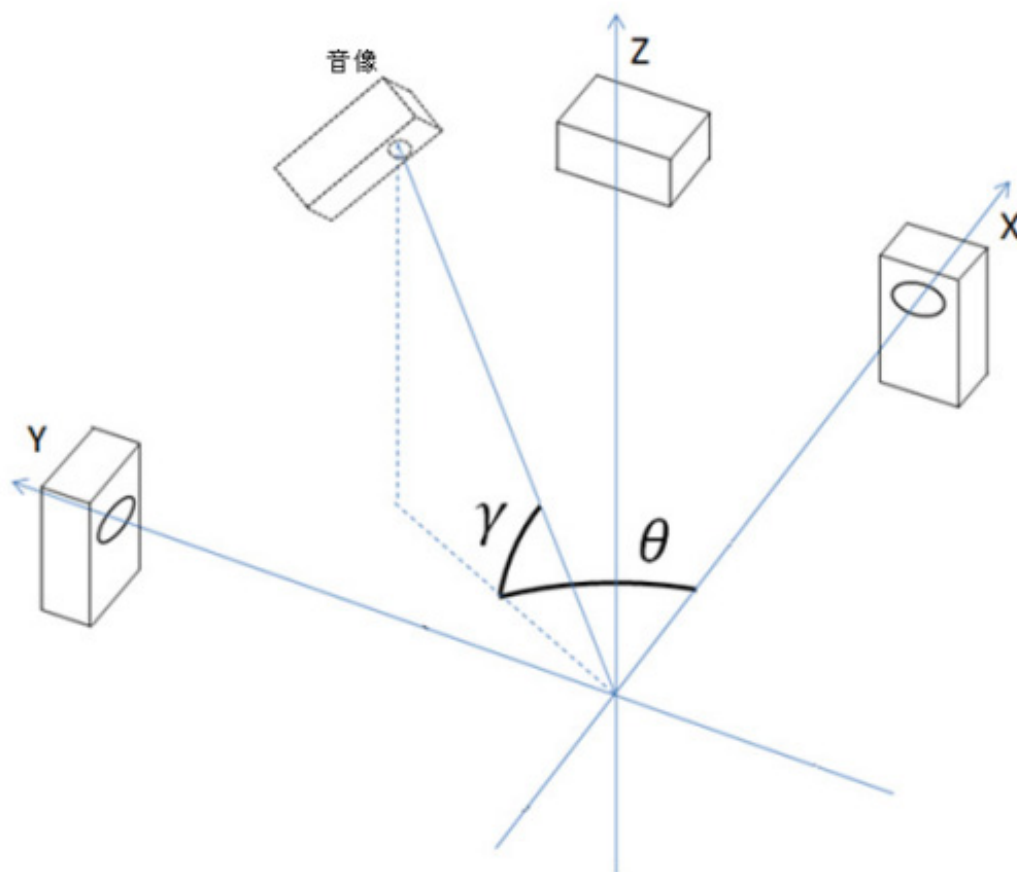
図3 三次元 VBAP

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場合、各スピーカーの固有の gain factor は次式で計算される。

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

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

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



ここで、 γ は仰角、 θ は方位角である。

図4 直交座標上のスピーカーと音像

2.2 バックトレース法

2.2.1 幾何学音響理論

主な三次元音場解析においては、幾何学音響理論に基づく代表的な解析手法として音線法と虚像法が存在する。しかし、両手法ともに欠点があり、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が考案された。

2.2.2 音線法

音線法とは、音線と呼ばれる単位エネルギーの進行経路を用いて、その反射履歴を追跡する計算手法である。

音源から発せられるエネルギーを無指向性とし、音線数を決定し音線から放射する。無指向性音源の場合、距離が離れていくにつれて音線の間隔が広がるため、単位面積当たりに入射する音線の数が減る。この音線数の減少が音線法における距離減衰の考え方である。

受音判定として、受音点を球として捉え半径を設定し、球内を音線が通過した場合に受音したと判定し、時刻、方向、エネルギーを記録する。

しかし、受音球の大きさや音線数によって本来受音されるべき音が受音されないことや、受音されるはずのない音が受音されてしまう欠点がある。

2.2.3 虚像法

虚像法とは、壁面に対する虚音源を作成し、その虚音源群、および、実音源からのそれぞれの寄与を各反射音、および、直接音の強さとし、それらの総和を算出することで、ある点の音の強さを求める手法である。虚像法では音線法と同様に、音は直進し、鏡面反射すると仮定する。作成された虚音源が有効なものかどうか、すなわち、受音点まで到達可能な経路を持つかどうかを判定する必要がある。矩形の室であれば、経路としては全虚音源が有効となる。しかし、遠くにある虚音源は距離減衰や壁面による吸音によって、受音点に到達するころには、ほぼ0となり、実質的には無効な虚音源となる場合がある。不要な虚音源を計算してしまうことにより計算効率が悪くなるということが欠点である。

2.2.4 バックトレース法

本研究では、仮想空間における三次元的な音の到来を算出する手段としてバックトレース法を用いる。

前述した両手法ともに欠点があり、それを補うために、バックトレース法が考案された。

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。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。

音線数を増やすことや、受信球の大きさを調整することで精度の高い計算結果が期待できる。

3 立体音響再生装置

3.1 使用機材

3.1.1 アクティブスピーカー



写真1 GENELEC 8010A スタジオ・モニター

写真1は本研究で用いたスピーカーはGENELEC 8010A スタジオ・モニターであり、専用アンプを内蔵したアクティブスピーカーである。製品の概要を表2に示す。

表2 GENELEC 8010A 製品概要[3]

最大出力	25W+25W
入力インピーダンス	10K Ω
入力端子	XLR
電源	AC100~240V
外形寸法	H195×W121×D116mm
質量	1.5kg

3.1.2 オーディオインターフェイス



写真2 RME Fireface UCX

写真2の Fireface UCX は RME 社により開発されたスタジオとライブ録音のための超コンパクトなフォーマットの高度に統合されたプロオーディオソリューションである。コンパクトなハイエンドインターフェイスを設計する RME の長い伝統を継承している。製品の概要を表3に示す。

表3 RME Fireface UCX 製品概要[4]

S/N 比	111dB
周波数応答性	44.1kHz, -0.5dB:6Hz-20.6kHz 96kHz, -0.5dB:6Hz-45.3kHz 192kHz, -1dB:-1dB:5Hz-90kHz
全高調波歪	< -105 dB, < 0.0005 %
入力端子	6.3mm TRS jack
最大入力レベル	+19dBu

3.1.3 再生ソフトウェア



写真 3 CUBASE4

写真 3 の CUBASE4 は、steinberg 社により開発され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。特徴を表 3 に示す。

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 Sound™-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 制作したシステム

本研究で制作した立体音響再生システムは、Shade 3D[6]で試聴する室形状を DXF ファイルとして作成し、バックトレース法を行って得られたインパルス応答に MATLAB[7]を用いてドライソースとの畳み込み処理を行う。畳み込みにより得た音を CUBASE4 に取り込み、各スピーカーで再生し 3 次元 VBAP による立体音響再生を行うものである。

3.3 立体音響装置

本研究で制作した簡易立体音響装置は、図5、図6のように聴取者の頭部を中心に等距離に、真下を除く直交座標軸上にスピーカーを5つ配置したものである。

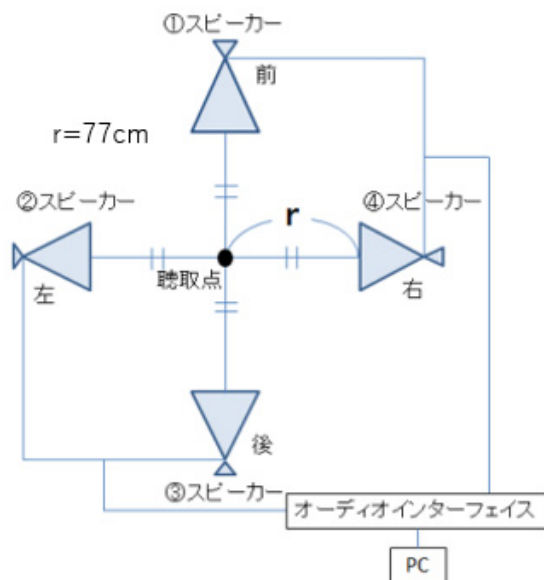


図5 上部から見た簡易立体音響装置

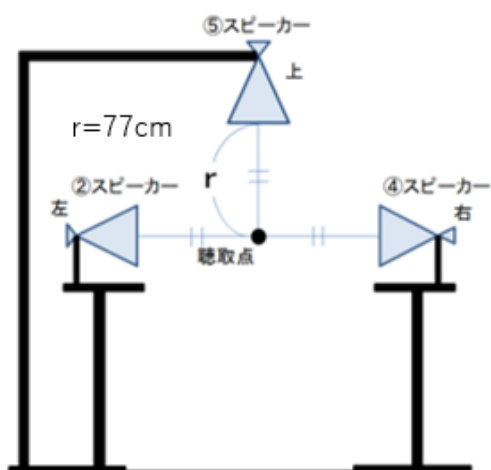


図6 側面から見た簡易立体音響装置

3.4 再生方法

Shade 3D で音場予測をするモデルの室形状を作成し、DXF ファイルで保存し、バックトレース法により音場計算を行う。これにより、音の到達時間、到来方向の X、Y、Z 座標、各周波数のエネルギーデータを得ることができる。

次に、バックトレース法によって得られたデータを用いて MATLAB により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り場合分けを行い、出力を行うスピーカーを決定する。図 7 のように、音像が第一象限にある場合①、④、⑤のスピーカーから出力を行う。本研究で作成したシステムでは、直交座標軸上にスピーカーを配置しているため、各スピーカーの音圧比はそれぞれの X、Y、Z 座標と等しくなる。よって各時間に到達する音の座標と周波数をかけあわせることにより各スピーカーが出力するインパルス応答を求め、音源を畳み込み立体音響が完成する。

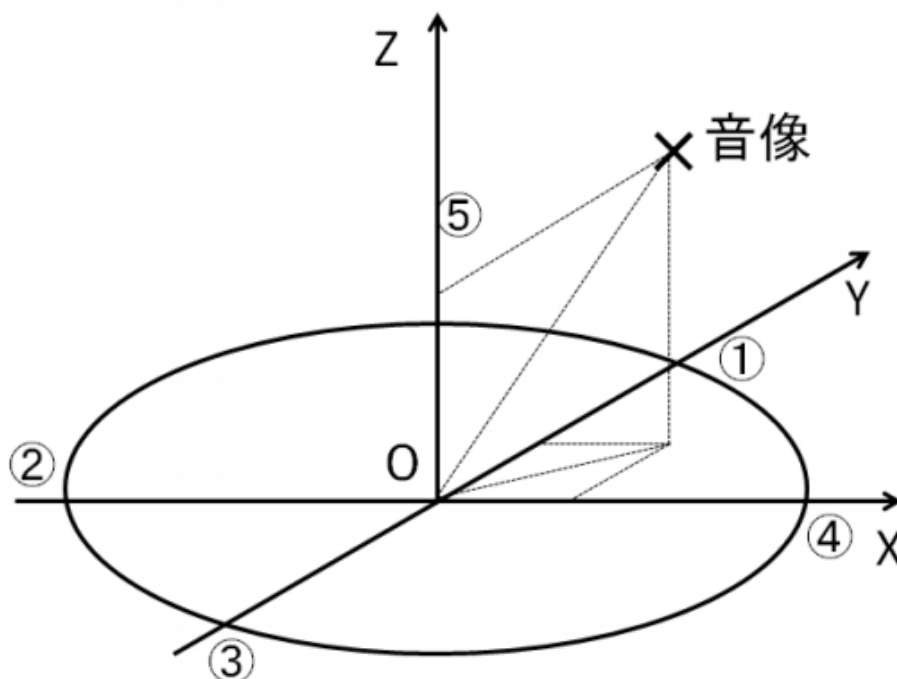


図 7 各スピーカー番号と象限

写真4は本研究で作成した簡易立体音響装置である。



写真4 簡易立体音響装置

4 聴感性能評価実験

4.1 実験方法

開発したシステムの再現性を確かめる手段として、聴感性能評価実験を行った。聴感性能評価用に5つの建物内でスピーチがされていることを想定した音源を作成した。5つの音源にはすべて同じドライソースを用い聴取者と音源の位置関係も一定とした。正常な聴力を持つ20代の男女10人に、無響室に設置した本システムにより各室形状の音源を3回ずつ、計15回ランダムに聴取させ、どの室形状を想定して作成された音源かを回答させた。

評価に用いた5つの室形状のモデルを図8、図9、図10、図11、図12に示す。

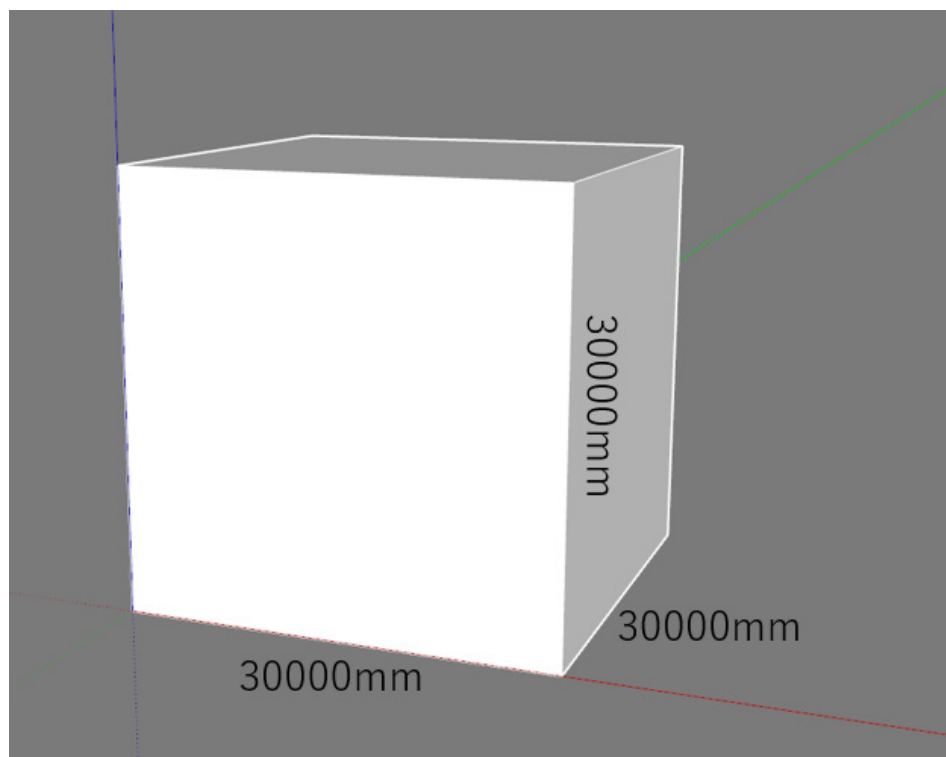


図8 無響室

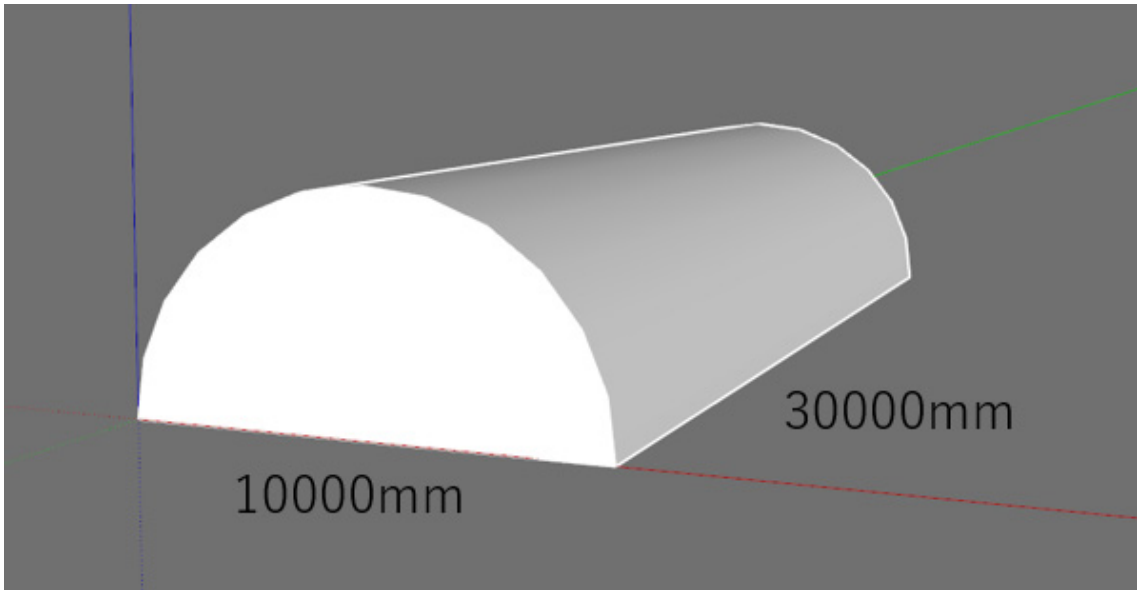


図9 トンネル

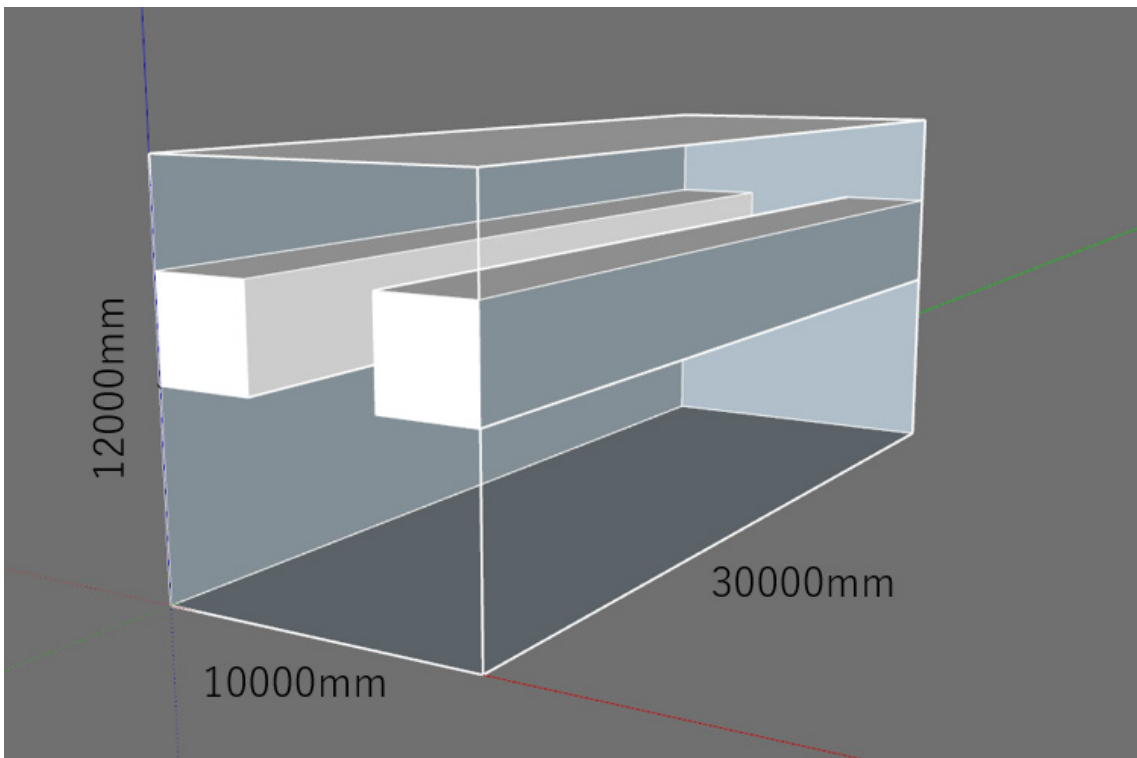


図10 コンサートホール

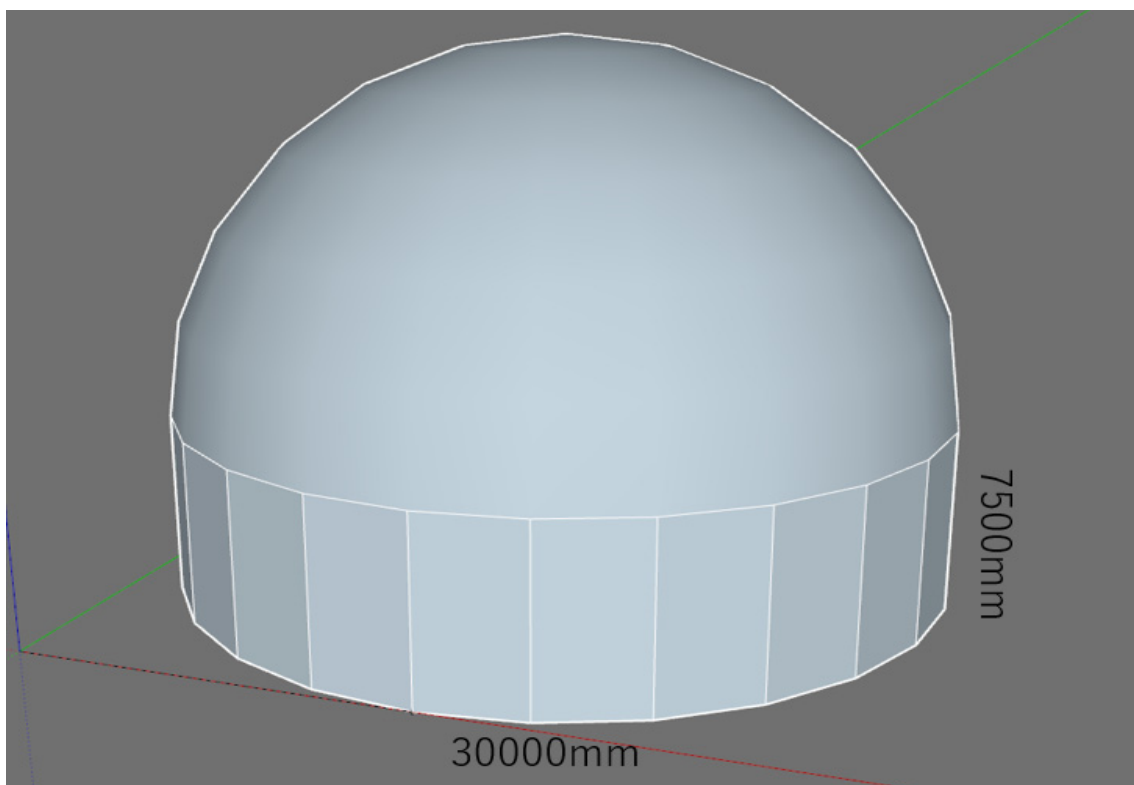


図1 1 ドーム

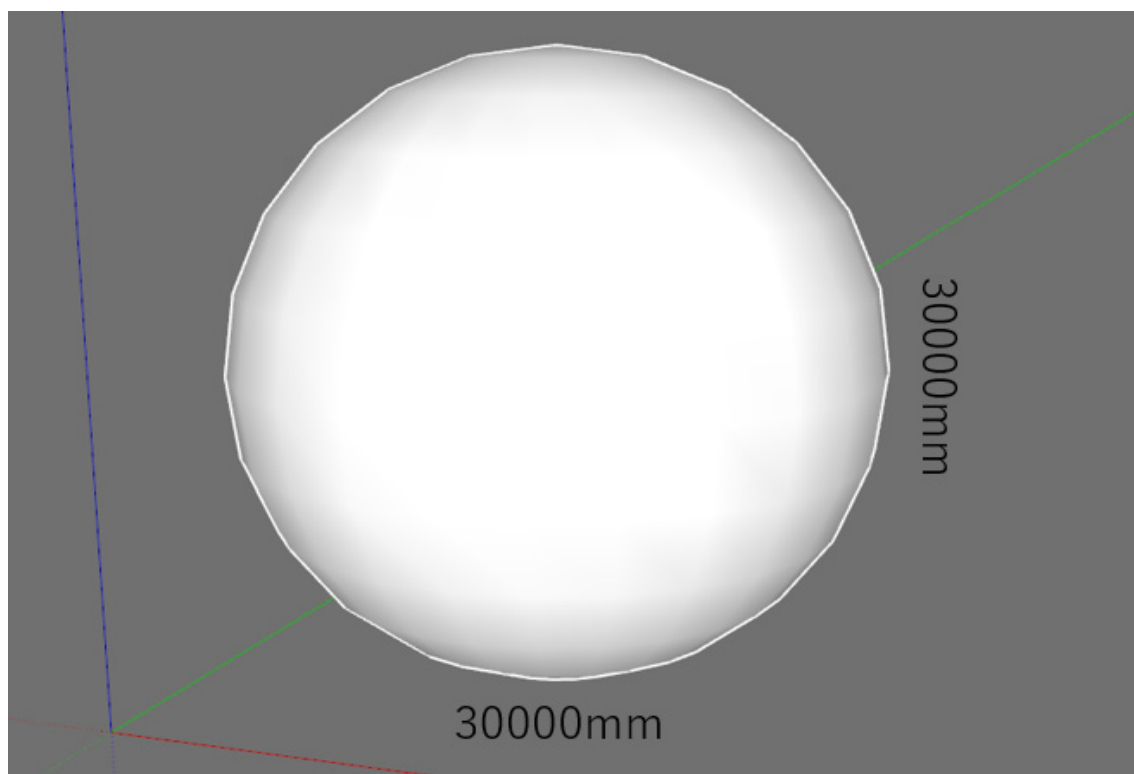


図1 2 球

実験時の被験者への教示を以下に示す。

「今から、5つの室形状を想定した音を各3回、計15回聴いていただきます。頭部を運動させず、正面を向いたままお聴き下さい。5つの音はそれぞれ、音の反響が一切ない無響室、ドーム、球、トンネル、コンサートホール内でスピーチがされていることが想定されたものになります。5つの音は全て同じ音源となっており、音源と聴取者の位置関係も常に一定となっています。

各音毎に、どの室形状を想定して再生された音か回答していただきます。各音はそれぞれ3回ずつ再生されますが、同じ回答が2回以下、4回以上になっても構いません。」

解答用紙

- 1回目 無響室 球 ドーム コンサートホール トンネル
- 2回目 無響室 球 ドーム コンサートホール トンネル
- 3回目 無響室 球 ドーム コンサートホール トンネル
- 4回目 無響室 球 ドーム コンサートホール トンネル
- 5回目 無響室 球 ドーム コンサートホール トンネル
- 6回目 無響室 球 ドーム コンサートホール トンネル
- 7回目 無響室 球 ドーム コンサートホール トンネル
- 8回目 無響室 球 ドーム コンサートホール トンネル
- 9回目 無響室 球 ドーム コンサートホール トンネル
- 10回目 無響室 球 ドーム コンサートホール トンネル
- 11回目 無響室 球 ドーム コンサートホール トンネル
- 12回目 無響室 球 ドーム コンサートホール トンネル
- 13回目 無響室 球 ドーム コンサートホール トンネル
- 14回目 無響室 球 ドーム コンサートホール トンネル
- 15回目 無響室 球 ドーム コンサートホール トンネル

4.2 評価方法

実験の結果をもとに、室形状毎、被験者一人あたりの正答率を算出した。また不正解の回答は各室形状が他のどの室形状と評価されるか割合を算出した。

4.3 結果・考察

実験結果を図13、図14、図15、図16に示す。

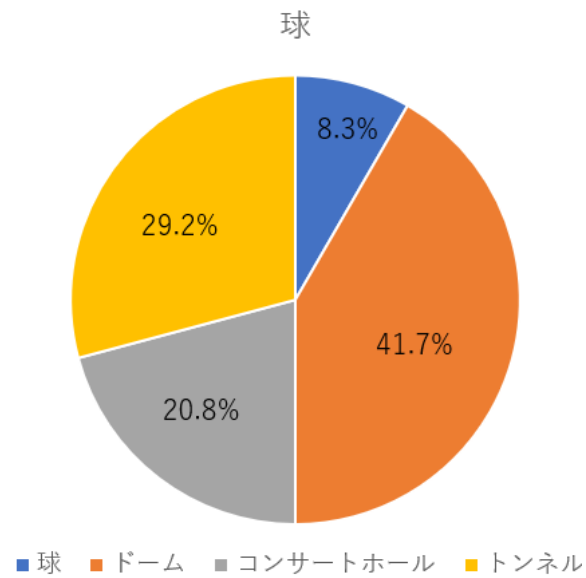


図13 球の正答率

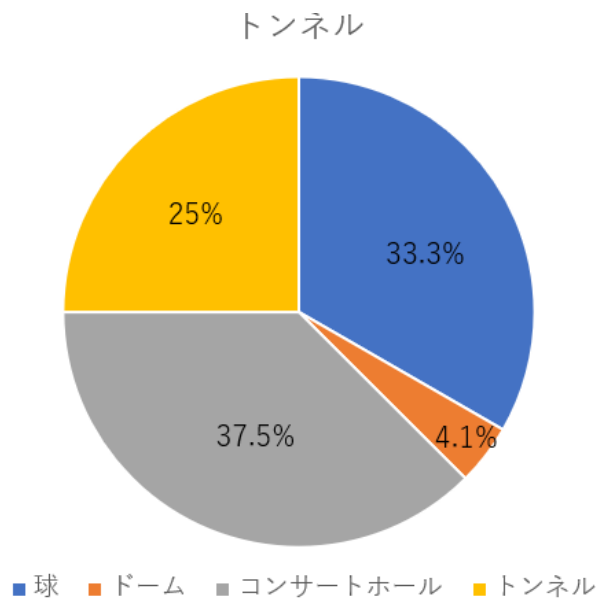


図14 トンネルの正答率

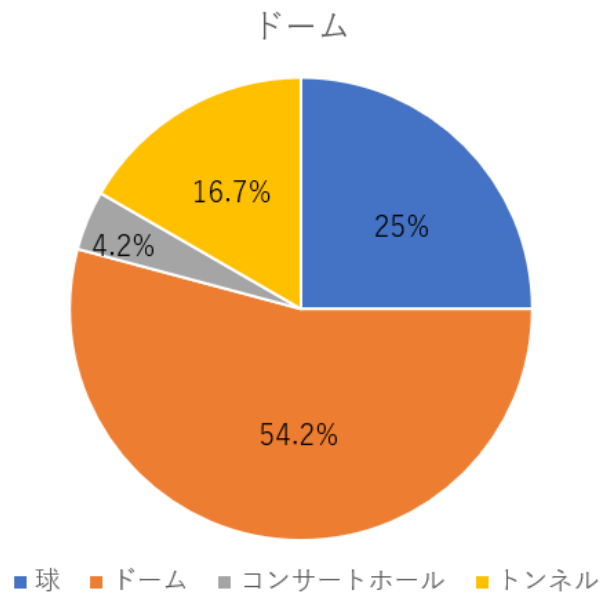


図15 ドームの正答率

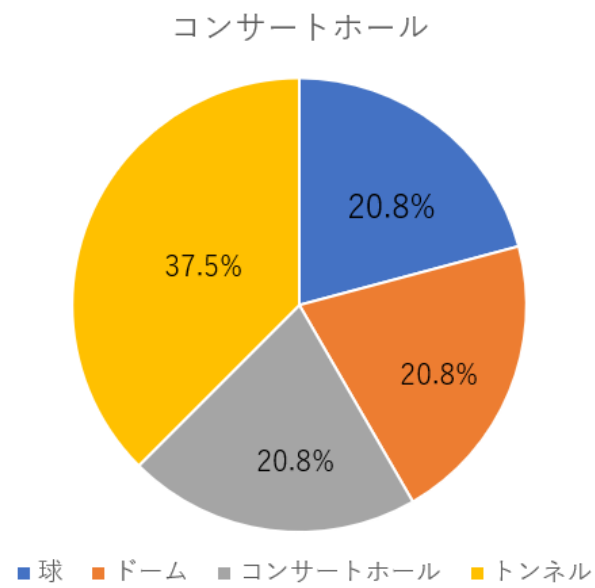


図16 コンサートホールの正答率

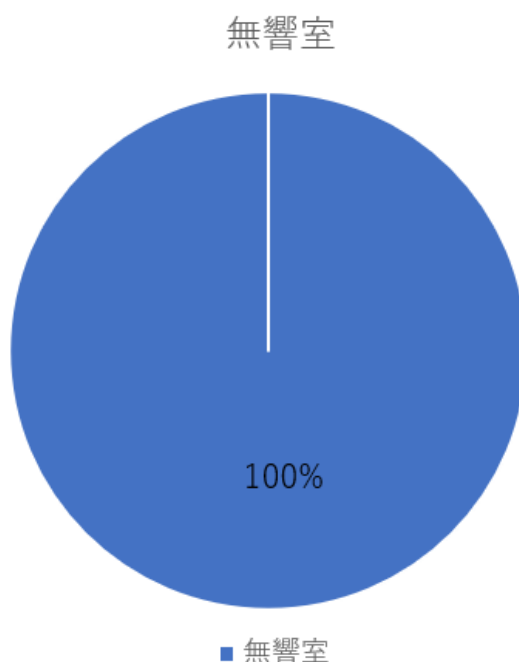


図 1 7 無響室の正答率

無響室の正答率は 100%であったが、他の室形状にはバラつきがみられた。無響室は他の室形状と違い反響が全くない事から判断が容易であるという実験前からの予測と相違はなかった。全体の正答率は約 40%であったが、この値は無響室を除く 4 つの室形状のみで評価実験を行った場合は 26%を示し、無作為に回答をする場合の正答率と差が無い事から被験者は室形状を判断できないと言える。しかし、無響室を除く 4 つの形状の中でも正答率は大きく相違が見られた。

正答率の低い原因としては、球など実際に訪れた事無い馴染みのない空間を評価実験の対象として性能を評価する事が困難であることが考えられる。今後の実験の際は、より特徴的な反響を起し、被験者が実際に訪れ聴取した事のある空間を形成する課題が必要である。

球やドームなどにおいては、フラッターエコーと呼ばれる発生した音が聴取者に直線的に到来し音が延々と反射を繰り返す現象が確認された。この結果から簡易立体音響装置による再現は可能であるが、高精度の評価方法が確立されていない事が正答率の低い最たる原因と考えられる。

コンサートホールとトンネルはそれぞれを誤答する事が多く、ドームと球にも同じような誤答が見られた。

これはコンサートホールとトンネル、ドームと球はそれぞれ近い形状をしている事により似た反響をしている事から被験者が違いを判断できない事が原因と考えられる。しかしこ

の結果から被験者は簡易立体装置により大まかな室形状を判断する事は可能ではないかと考えられる。

5 総括

本研究では従来の立体音響装置に懸念される高いコストと広い空間が必要とされる点を改善すべく、5つのスピーカーでの再現を試みた。低コストで簡易なシステムの製作には成功したが、評価方法が不適當と考えられる原因から明確な結果を得ることができなかった。今後の課題としては、前述した一般的に認知度の高い実際に聴取した事のある空間を室形状の対象として評価実験を行う事が挙げられる。

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] https://www.genelec.jp/sites/default/files/media/Studiomonitors/8000SeriesStudioMonitors/8010A/8010a_opman_jp.pdf 2021/1/30
- [4] [Fireface UCX - RME Audio Interfaces | Format Converters | Preamps | Network Audio & MADI Solutions \(rme-audio.de\)](#) 2021/1/30
- [5] https://japan.steinberg.net/jp/products/legacy_products/cubase_4.html 2021/1/27
- [6] <https://shade3d.jp/> 2021/1/30
- [7] <https://jp.mathworks.com/products/matlab.html> 2021/1/30