

独奏時を対象としたコンサートホールステージ上での
演奏のしやすさに関する物理指標の作成方法の提案

関西大学大学院 理工学研究科

環境都市工学専攻 建築学分野

建築環境工学第 I 研究室

23M6434 川口 菜々子

指導教員 豊田 政弘

論文要旨

これまでのコンサートホール音響設計は聴衆に重きを置いて行われてきた。しかしながら、演奏者も聴衆同様、コンサートホールになくてはならない存在であり、演奏者にとっての「演奏のしやすさ」は今後建設されていくコンサートホールが後世に残っていくために重要なものになっていくだろう。そこで演奏者にとっての「演奏のしやすさ」を音響設計現場で容易に算出できるよう、定量化することを目的として本研究を開始した。

本研究では無響室内に設置した VBAP の原理に基づく立体音響装置を用い、4人の演奏者の協力のもと、演奏実験をそれぞれ2回行った。1回目の予備実験では、2回目の本実験に用いる心理評価尺度を各演奏者において個別に設定するため、インタビュー形式の演奏実験を行った。この時、再現音場はシューボックス型、ワインヤード型、五角錐型の3種の形状を用い、音量調整方法を音響実務者の耳で行ったものと数値的に音量調整を行ったものの計6種類の設定を使用した。2回目の本実験では、予備実験と同様の実験環境の元、実在するウィーンムジークフェラインザール、ボストンシンフォニーホール、アムステルダムコンセルトヘボウの3つのシューボックス型コンサートホールを対象として、予備実験で得られた個別尺度を用い、演奏者による心理評価を行った。その結果を因子分析（最尤法）し、ストレングス、クラリティ、残響時間、初期残響時間、初期側方エネルギー率、時間重心の6つの物理指標の背後に潜む「演奏のしやすさ」という共通因子を定量的に導き出し、主観的な「演奏のしやすさ」と良い対応が得られることを確認した。しかし、因子分析を用いる手法では、「演奏のしやすさ」を定量的に算出するにあたって手間がかかりすぎるという問題から音響設計現場に容易に適用が可能とは言い難い。そこで、「演奏のしやすさ」の算出を容易にするため、6つの物理指標から因子分析で得られた「演奏のしやすさ」得点を重回帰分析することで改めて定量化することを試みた。

結果としては、本実験で扱ったコンサートホール数が3つと少なかったために、重回帰分析においてはストレングスと時間重心のみが考慮され、残響時間などの他の指標が演奏のしやすさに影響を与えないという直観的には信じ難い式が得られた。ただし、対象とするコンサートホール数を増やせば他の物理指標も考慮されることが確認されている。

本研究では演奏者数や本実験で扱ったホール数が少ないため、もし重回帰分析が有意なものとして定量化できていたとしても、得られた式が全世界において適用できる「演奏のしやすさ」の式であるとは言い難いであろう。しかしながら、本研究で用いた手法は「演奏のしやすさ」を定量化するにあたって有用なものであると考えられる。今後音響研究者が演奏者と協力して同様の手順を踏んで研究を進め、サンプル数を増やせば、将来的には「演奏のしやすさ」がコンサートホール音響設計現場において重要な指標として用いられるようになると期待される。

目次

1	序論	1
1.1	研究背景	1
1.2	既往研究	2
1.3	研究目的	3
2	研究方法	4
2.1	原理	4
2.1.1	バックトレース法	4
2.1.2	VBAP	13
2.1.3	実装	17
2.2	研究の流れ	19
3	演奏実験	20
3.1	予備実験	20
3.1.1	実験目的	20
3.1.2	実験対象	20
3.1.3	実験方法	21
3.1.4	再現音場・システムについて	22
3.1.5	実験風景・機材配置図	27

3.1.6	実験結果（インタビュー結果を基にした個別尺度の設定）	30
3.2	本実験	41
3.2.1	実験目的	41
3.2.2	実験対象	41
3.2.3	実験方法	44
3.2.4	再現音場・システムについて	44
3.2.5	実験風景・機材配置図	45
3.2.6	実験結果（アンケート結果）	48
4	結果	52
4.1	本実験分析方法	52
4.2	分析結果①(因子分析)	53
4.3	分析結果②(重回帰分析)	57
4.4	考察	58
5	結論・今後の展望	60
	参考文献	61
	謝辞	62

1 序論

1.1 研究背景

1982年、大阪にクラシック専用ホールである「ザ・シンフォニーホール」が建設されたのを皮切りに、日本はコンサートホール建設ラッシュを迎えた。現在、日本には様々な用途に対応する多目的ホールや、ザ・シンフォニーホールのようにクラシック音楽に特化したコンサートホールが大小問わず数多く存在する。そんな中で新しく建てられるコンサートホールが多くの人に使われ、長く後世へと残っていくためには、今までのような「聴衆にとって良いホール」は前提条件となり、新しい何かを求められるであろう。

そこで、私は今後の音響設計においては「演奏者にとっての演奏のしやすさ」が重要になると考えた。演奏者は、ステージ上で自分の感じていることを、音楽を通して聴衆に伝える。演奏者なくして演奏会は成り立たず、演奏会なくしてコンサートホールは存在し得ない。本来、コンサートホール設計において重要視されるべき人物には、聴衆だけでなく、演奏者も含まれるはずである。勿論プロの演奏者はどんな環境でも美しい音楽を聴衆に届けることができるように、その教育過程で訓練されているが、演奏しやすいホールと演奏しにくいホール、どちらかを選ぶとなったら、演奏者は誰しも演奏しやすいホールを選ぶであろう。演奏しやすいホールの方が、演奏者の音楽を、より演奏者の望んだ形で、聴衆に届けることができるからである。

演奏者はもちろんのこと、音響研究者にとっても「演奏のしやすさ」というものは興味・関心の対象であり、今まで様々な切り口から多くの研究が行われてきた。しかしながら、「演奏のしやすさ」とは世に数多く存在する楽器によって、演奏者の価値観によって、また演奏形態によって複雑に変化し得るものであり、未だその実態は定量的に表されていない。

そのため、2022年の関西大学卒業研究において、私はこの「演奏のしやすさ」を定量的に求めることを目的として研究を行った。結果として定量化には至らなかったが、演奏者の視点に立って、演奏者の言葉を理解して研究を行うことが大切であるという知見を得た。よって、卒業研究で得た知見を基に、より限定的な場面において「演奏のしやすさ」がどういったものであるのかを音響研究者が演奏者の視点に立って考え、音響物理学の知識を以て定量化すること、またそのプロセスを示すべく、本研究を開始した。

1.2 既往研究

コンサートホールの音響については様々な視点から研究が行われており、本研究同様「演奏者」を対象とした研究は多数存在する。その中でも、上野[1]は自身の博士論文にてプロの演奏者を対象として演奏とインタビューを組み合わせた形式の実験を行い、演奏家社会におけるコンサートホールの価値を演奏家の言葉を通して知り、実験時の演奏環境を物理指標に落とし込むことで、音響研究者が音楽芸術の領域に踏み込み、工学的な知見を得ることを可能とした。残響時間、初期反射音エネルギー、後期反射音の3つが演奏家によるホールの評価に影響を与え、特に後期反射音についてはこれによって「ホールの助け」を感じられるものであると推測している。しかしながら、それらの影響を物理指標として定量的に示すには至っていない。また、第4章「演奏家の評価と音響特性との関係」において、演奏家による再現音場の評価を行っているが、ここでは再現音場の情報として、実在するコンサートホールで測定したインパルス応答が使用されている。実測されたホールのインパルス応答は、測定環境に依存するため、結果の再現性が十分であるとは言えない。

1.3 研究目的

本研究では、実測されたインパルス応答を利用した既往研究で生じている「再現性」という課題を、演奏実験で使用するインパルス応答として、計算機シミュレーションにより作成したものを使用することで解決しつつ、本研究での結果を将来の音響設計現場において容易に適用できるよう、「演奏のしやすさ」を定量的に示すこと、また、今後の音響研究、特に「演奏のしやすさ」に関する研究に何らかの知見・指針を与えることを目的とする。

2 研究方法

2.1 原理

2.1.1 バックトレース法

本研究で採用するバックトレース法について説明する。バックトレース法とは、幾何音響理論に基づいた音線法と虚像法という二つの手法を組み合わせることによって両者のデメリットを補い、より効率的に計算を進めつつ精度の高い結果を導き出す手法として Vorländer[2]により提案された手法である。ここでは、バックトレース法の基本である音線法と虚像法について説明した後、バックトレース法の詳細を述べる。

- 音線法[3]

音線法とは、音源から多数の音粒子を放出し、その音粒子が辿る経路（音線）を追跡する計算手法である。音粒子は最速経路を通るという Fermat の法則に則るため、温度・湿度が均一な媒質下において音線は直進し、壁面にぶつかると鏡面反射する（図1）。

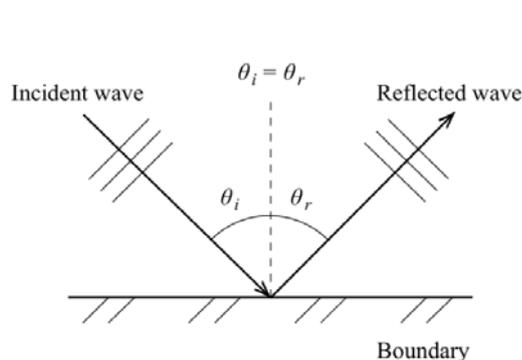


図1 鏡面反射

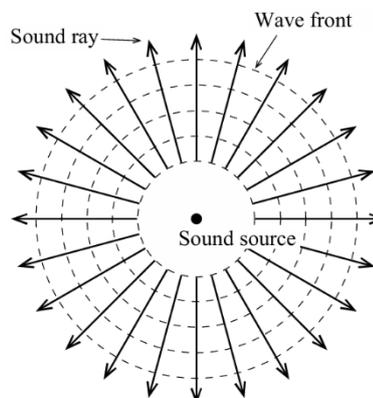


図2 無指向性音源

(1) 音源

建築音響における音線法では、無指向性の音源を与えることが多い。無指向性の音源を与えるには、音線数の決定後、図2のように等立体角ごとに単位エネルギーを持った音線を音源位置から放射する。無指向性音源では音源から距離が離れていくにつれ、音線同士の間隔が広がり、単位面積あたりの音粒子密度が減少する。これが音線法における距離減衰の考え方である。

(2) 境界面の扱い

境界面に入射した音波のエネルギー E_i は、反射するエネルギー E_r 、境界面で失われるエネルギー E_l 、及び、透過するエネルギー E_t に分けられる（図3）。エネルギー保存則から、次式が成り立つ。

$$E_i = E_r + E_l + E_t \quad (1)$$

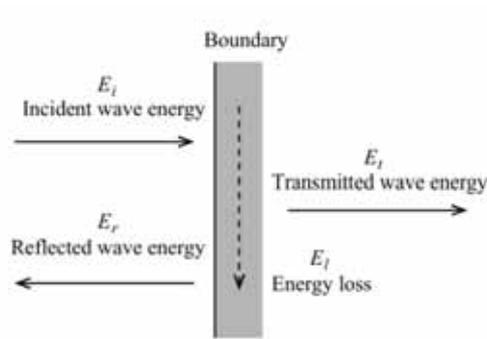


図3 境界面に入射した音波

このとき、入射するエネルギーと反射するエネルギーの比を反射率 r といい、

$$r = \frac{E_r}{E_i} \quad (2)$$

と表される。また、このとき吸音率 α は、

$$\alpha = 1 - r \quad (3)$$

と表される（図4）。音線法において、音線が境界面にぶつかったとき、反射する音線エネルギーは、境界面の吸音率を α とすると、反射率は $1 - \alpha$ となるため、

$$E_r = E_i(1 - \alpha) \quad (4)$$

と表される。

また、斜入射を考慮する場合、小林[4]の研究により

$$E_r = E_i \left| \frac{(1 + \sqrt{1 - \alpha})\cos\theta - (1 - \sqrt{1 - \alpha})}{(1 + \sqrt{1 - \alpha})\cos\theta + (1 - \sqrt{1 - \alpha})} \right|^2 \quad (5)$$

とする（図5）。

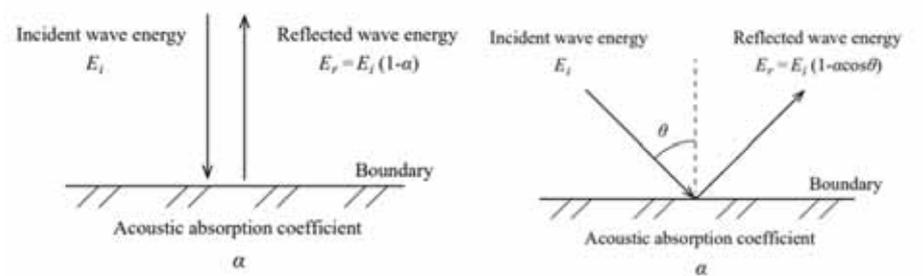


図4 境界面における音のエネルギーの扱い

図5 斜め入射の場合

(3) 判定

音線の辿ってきた経路を追跡するため、音線がどの壁面に衝突するのかを判定する必要がある。ここでは閉空間において、壁面の法線ベクトルが音場に対して内向きとなるように設定する。法線ベクトルの向きは頂点の順番と図6のように対応させる。次に、法線ベクトルと音線ベクトルの内積を求める。求めた内積が負のとき、音線はその壁面に向かってしていると判定できる(図7)。壁面に向かってることが判定できた場合、続いて音線と壁面の交点が壁面内にあるかどうかを判定する。図8に壁面の頂点と交点の座標を示す。頂点と交点の座標間の関係性は未知数 a 、 b 、 c を用いると

$$ax_1 + bx_2 + cx_3 = x_n \quad (6)$$

$$ay_1 + by_2 + cy_3 = y_n \quad (7)$$

$$az_1 + bz_2 + cz_3 = z_n \quad (8)$$

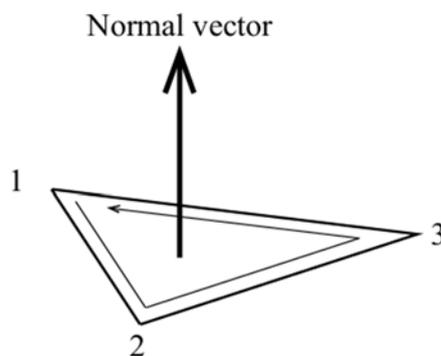


図6 法線ベクトルの向き

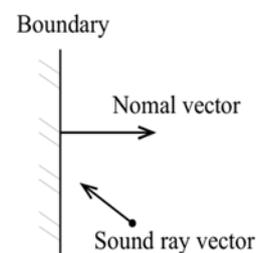


図7 壁面に向かう音線ベクトルの判定

と表せる。未知数が、 $0 \leq a, b, c \leq 1$ 、かつ、 $a+b+c=1$ の条件を満たすとき、壁面内に交点があると判定することができる。室形状によっては図 9 のように交点が二つ現れることがあるが、その場合は音線の始点に近い方の交点を真の交点と判定する。

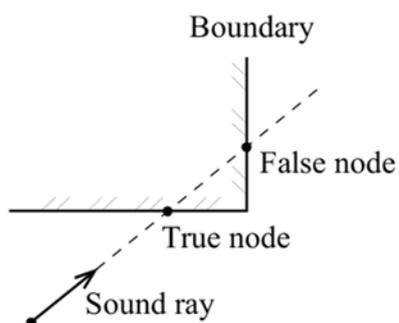


図 8 交点の判定

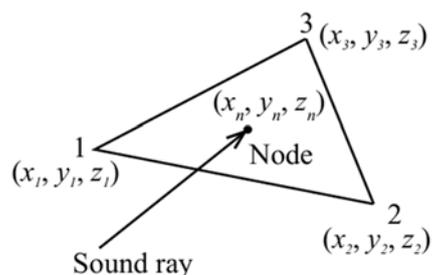


図 9 真交点の判定

(4) 受信判定

音線がある壁面に向かって進行している間に受信点を通過するかを判定する。まず受信点と音線の最短距離を求め、その距離が設定した受信球の半径内であれば受信したと判定する。受信したと判定した場合、受信時刻とエネルギーを記録する。

(5) 計算手順

図 10 に音線法のフローチャートを示す。まず、室形状や基本情報を入力し、音源、また壁面の法線ベクトルを作成する。次に、音線を追跡して壁面との衝突の判定、及び受信判定を行う。最後に、同時刻に受信した音線のエネルギーを合算し、結果を出力する。

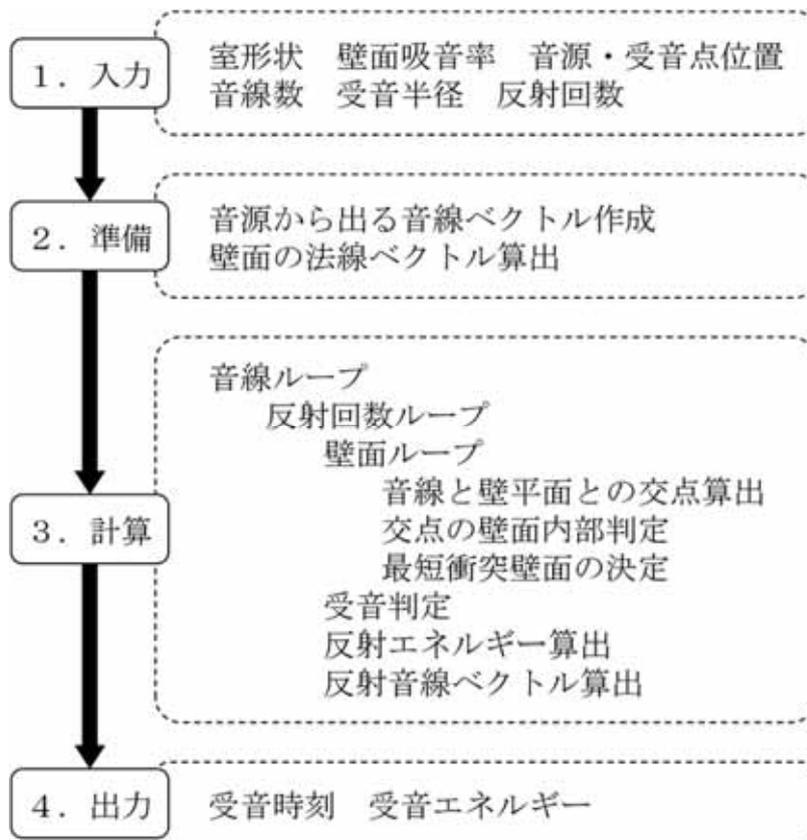


図 10 音線法フローチャート

(6) 特徴

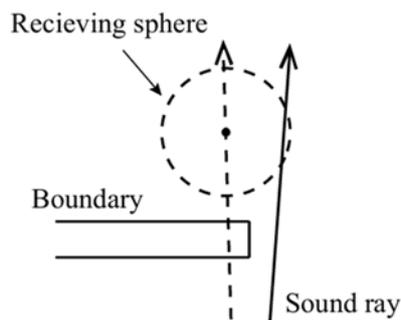


図 11 音線法の欠点 1

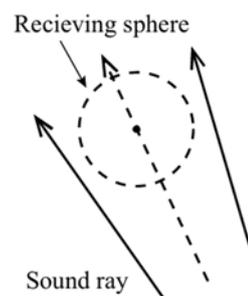


図 12 音線法の欠点 2

音線法は計算や音線の可視化が容易である一方、音線数や受音半径の設定によって様々な誤差が生まれやすいといった欠点もある。例えば、図 11 は音線数が少ない、または受音半径が小さいために受音されるべき音線が受音されたと判定さ

れない場合を示したものである。図 12 は受音半径が大きすぎるために、受音しないはずの音線が受音したと判定される場合を示したものである。

- 虚像法[3]

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、音は直進し、また鏡面反射すると仮定する。しかし、距離減衰の考え方は音線法と異なり、各虚音源において距離の逆 2 乗則を考慮する必要がある。

(1) 音源

音線法では音源から等立体角ごとに無数の音線を放射していたが、虚像法では各音源と受音点を結ぶことで、各音源から受音点までの経路を考える。その経路が実際に到達可能な経路かどうかを判定し、到達可能な経路であった場合、虚音源ごとの距離減衰、および、受音点の到達時間を算出する。

また、室内の総壁面数を m 、最大反射時数を k とすると、虚音源の総数 N は

$$N = \sum_{i=1}^k m(m-1)^{i-1} \quad (9)$$

と表すことができる。

(2) 境界面の扱い

境界面の扱いは音線法と同様であるため、音線法(2)を参照されたい。

(3) 判定

作成された虚音源が有効なものかどうかを判定するには、その虚音源が受音点まで到達可能な経路を持つかどうかを考える必要がある。例えば矩形の室では、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り受音点に到達する頃にはそのエネルギーがほぼ 0 となり、実質的には無効なものとなる場合がある。

一方、不整形な室の場合、経路として成立する虚音源を判定するには複雑なプロセスが必要である。本論文では詳細は割愛するので、Borish[5]の文献等を参照されたい。

(4) 受音

各音源から受音点までの距離を算出し、周波数領域でそれらを足し合わせるこ

とで周波数事速度ポテンシャルを算出することができる。受音する速度ポテンシャルを ϕ [m²/s]、波数を k [1/m]、音の総数を N 、 n 番目の音源のエネルギーを E_n [J]、 n 番目の音源から受音点までの距離 r_n [m]とすれば、

$$\phi \propto \sum_{n=1}^N \sqrt{E_n} \frac{e^{ikr_n}}{r_n} \quad (10)$$

と表せる。この結果をフーリエ逆変換することでインパルス応答を求めることができる。

(5) 計算手順

図 13 に虚像法のフローチャートを示す。まず始めに、室形状や音源・受音点位置などといった基本情報を入力し、壁面に対する虚音源を式(9)に基づく個数だけ作成する。次に、音粒子の伝搬経路と壁平面との交点を算出し、その虚音源が有効であるかどうかを判定し、有効であるものはエネルギーの減衰量を算出する。最後に式(10)によって受音点の速度ポテンシャルを求め、フーリエ逆変換をすることで、計算結果としてインパルス応答が出力される。

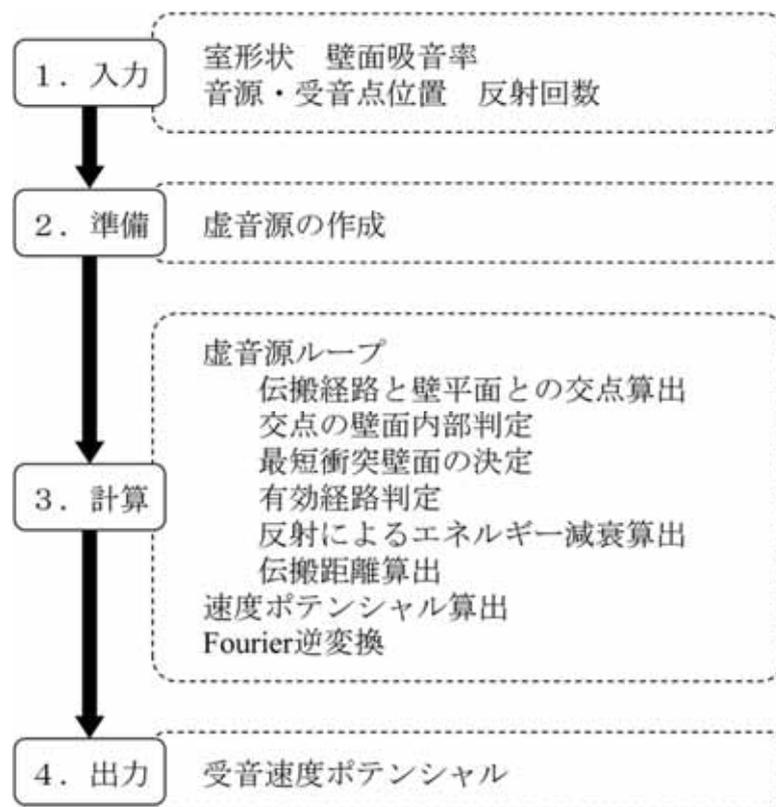


図 13 虚像法のフローチャート

(6) 特徴

虚像法では、到達時間やインパルス応答が音線法に比べて正確に求まるため、初

期反射音構造の検討やエコー障害のチェック、反射音の指向性の検討に有効である。しかし、式(9)に示した数の虚音源を作成が必要となるものの、室形状が不整形の場合の虚音源の有効性判定が難しくなる点、また壁面数や最大反射回数が多いものの場合において多くの虚音源が有効でないことが多いために計算効率が悪い点が欠点として指摘されている。

● バックトレース法[2]

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) 判定

バックトレース法における有効虚音源の判定は、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行う。図 14 は音線法によって 1→4 という反射経路を通して受音し、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、虚音源は有効であると判断できるということを示している。図 15 は音線法によって 1→8 という反射経路を通して受音しており、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っているため、虚音源は無効であると判定されるということを示している。

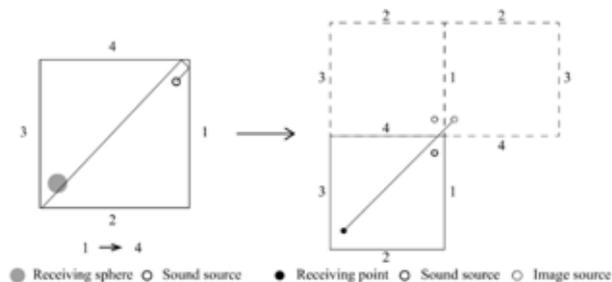


図 14 有効虚音源

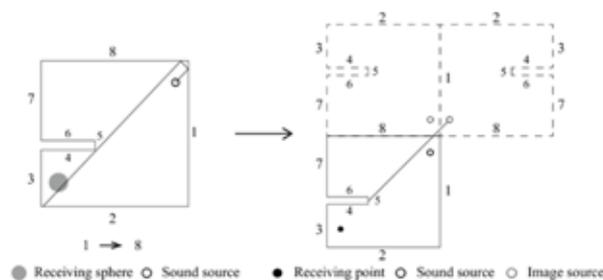


図 15 無効虚音源

(2) 計算手順

図 16 にバックトレース法のフローチャートを示す。まず、室形状や基本情報を入力し、音線法によって受信した音線の反射経路のみを取得する。次に、重複した経路を削除し、バックトレース法により虚音源が音線法によって得られた音線の反射経路を辿れるかどうかを判定する。最後に有効な虚音源から得られたパルスを足し合わせることで、受信時刻と受信エネルギーが結果として出力される。

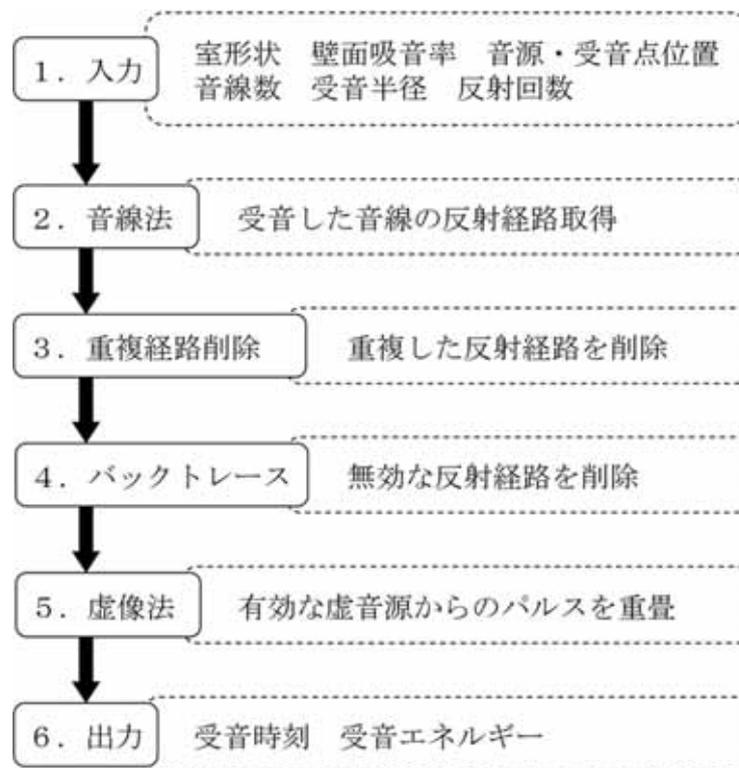


図 16 バックトレース法のフローチャート

(3) 精度

Vorländer[2]は、この手法を用いて計算することにより、音線法による受信領域を比較的大きく取り、かつ、音線法を減らしても計算精度を保てることを示し、計算時間の大幅な短縮が可能になったことを報告している。

2.1.2 VBAP

次に、VBAP (Vector-Based Amplitude Panning)[6]について説明する。ヒトは聴こえてきた音がどこから発せられているかを認識する際、左右の耳における両耳間時間差 ITD (interaural time difference) と、両耳間音量差 ILD (interaural level difference) を主に手掛かりとする。VBAP とはこの人間の音像定位知覚の仕組みを利用して開発された立体音響再生手法の一つであり、聴取者から等距離の位置に配置した複数のスピーカ-の音量差によって、スピーカ-で構成された領域内の任意の点に音像を定位させることを可能とする (図 17)。

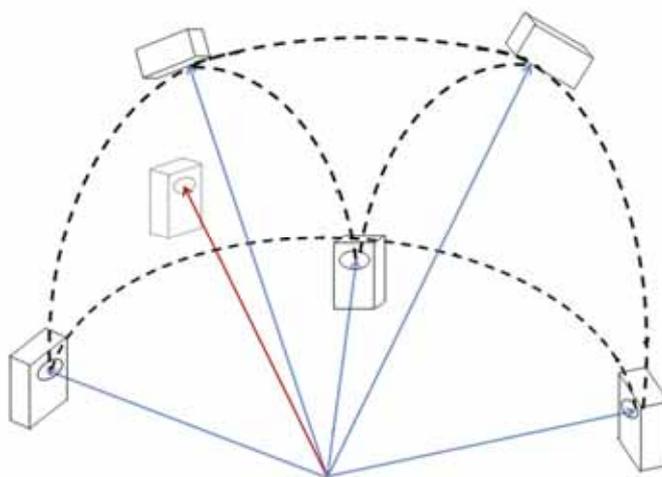


図 17 VBAP

VBAP には最も一般的な立体音響再生手法である二次元 VBAP と、それを三次元に適用した三次元 VBAP が存在する。まず二次元 VBAP について、原理を説明する。

図 18 に示すように、聴取者から等距離かつ正中面に関して対称にスピーカ-を配置した場合を考える。二つのスピーカ-が同位相の信号を発している時、二つのスピーカ-の振幅を変化させる、即ち音量を変化させると、聴取者は二つのスピーカ-間に構成される弧上の任意の点に音像があると知覚する。この時、各スピーカ-から発せられる信号の振幅は gain factor[6]によって個々に制御される。

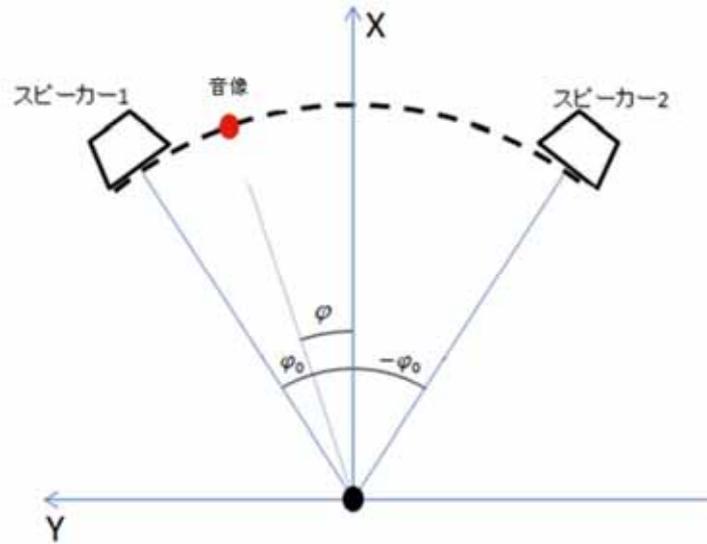


図 18 二次元 VBAP

音像の方向は各スピーカーが出力する信号の振幅の関係性に依存する。音の大きさを一定にしたまま、音像を二つのスピーカー間に構成される弧上の任意の点に定位させるための条件式は、次式で表される。

$$g_1^2 + g_2^2 = C \quad (11)$$

ここで g_1 、 g_2 は各スピーカーの gain factor、 C は円弧の半径を決定する定数である。図 18 では、スピーカー1 から出力された信号の振幅がスピーカー2 の振幅よりも大きくなっているために、音像がスピーカー1 の方に偏って定位していることが分かる。

続いて、音像を自由に定位させるための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、Blumlein[7] によって最初に提案され、Bauser[8] によって再定式化された立体音響の正弦の法則に従う。

$$\frac{\sin\varphi}{\sin\varphi_0} = \frac{g_1 - g_2}{g_1 + g_2} \quad (12)$$

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 は聴取者を中心として X 軸と音像の成す角であり、 $\pm\varphi_0$ は X 軸と各スピーカーの成す角である。た

だし、式(12)は聴取者の頭部が前方(X軸方向)を向いている時のみ有効である。もし聴取者が頭部を回転させる場合、式(13)がより正確となる。

$$\frac{\tan\varphi}{\tan\varphi_0} = \frac{g_1 - g_2}{g_1 + g_2} \quad (13)$$

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レベルを一定に保った場合、gain factor は式(11)と式(12)、または、式(11)と式(13)を用いて算出可能である。式(12)と式(13)のわずかな違いは聴取者が頭部を回転させることで生じる音像の移動によるものであり、主観的な評価の際には無視できるほどのものである[9]。

次に、三次元 VBAP について説明する。音像の位置は、二次元 VBAP と同様に各スピーカーの出力する信号の振幅と、聴取者とスピーカーの位置関係により決定される。図 19 のように、聴取者から等距離の位置に三つのスピーカーを配置した場合を考えると、この時音像は三つのスピーカーで構成された球面三角形上に定位する。この時、各スピーカーから発せられる信号の振幅は 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、音像を三つのスピーカー間に構成される球面三角形上の任意の点に定位させるための条件式は、次式で表される。

$$g_1^2 + g_2^2 + g_3^2 = C \quad (14)$$

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

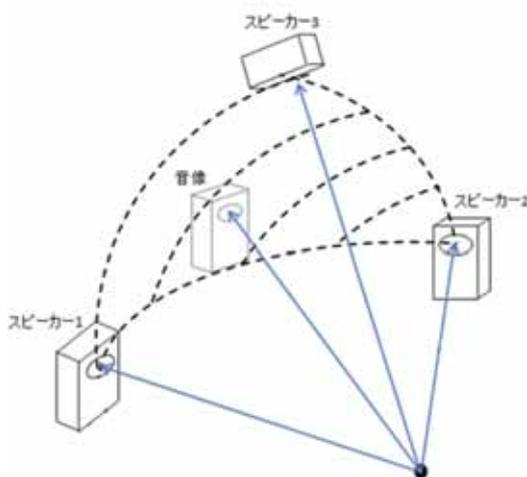


図 19 三次元 VBAP

図 20 のように聴取者を原点として、3 つのスピーカーが直交座標系の軸上に配置された場合、各スピーカーに固有の gain factor は次式で表される。

$$g_x = C \cos \theta \cos \gamma \quad (15)$$

$$g_y = C \sin \theta \cos \gamma \quad (16)$$

$$g_z = C \sin \gamma \quad (17)$$

ここで γ は仰角、 θ は方位角である。gain factor の算出方法は球面座標系と直交座標系の座標変換に類似している。

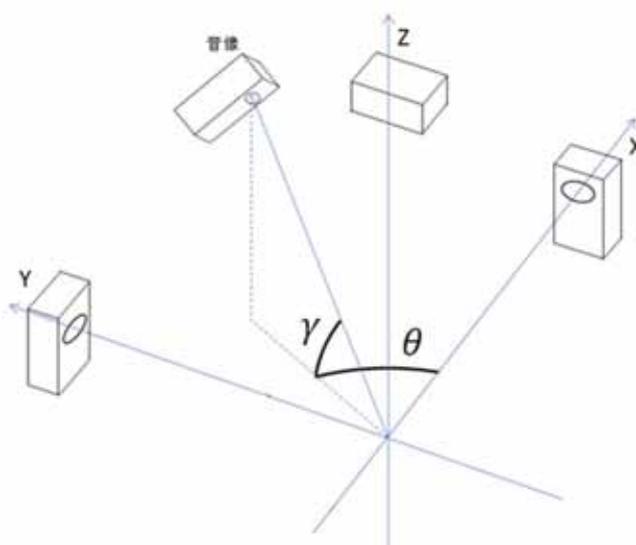


図 20 仰角と方位角の関係

2.1.3 実装

以上の原理を本研究に実装した。本研究では6つのスピーカーを用いて立体音響装置を作成した。以下、図 21～23 において、立体音響装置の寸法、および制作した機材の写真を示す。

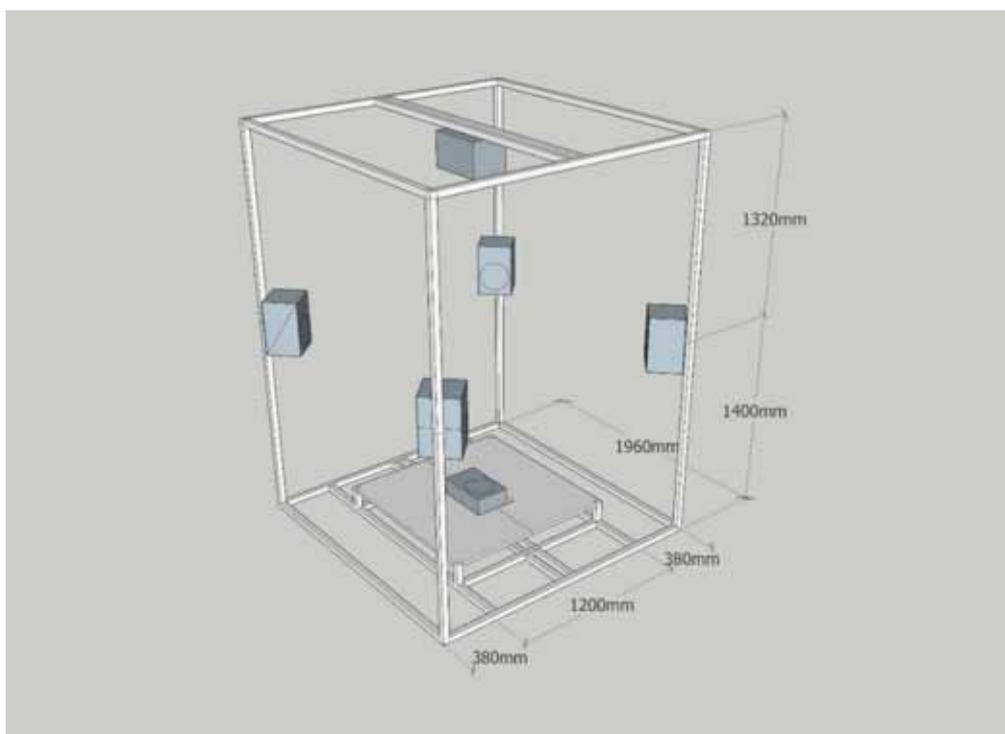


図 21 立体音響装置の寸法



图 22 立体音響装置①

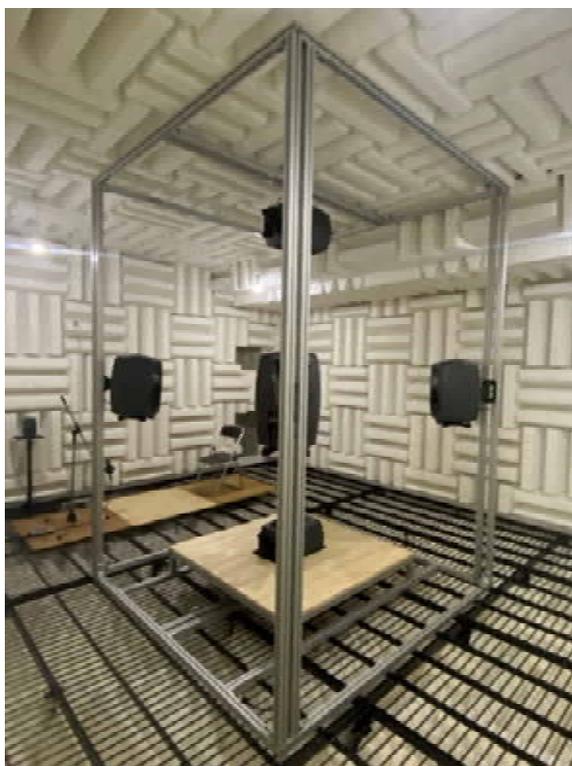


图 23 立体音響装置②

2.2 研究の流れ

本節では研究の流れについて述べる。まず、上野[1]の博士論文を参考にし、2段階の演奏実験を行う。1段階目として「予備実験」を設定し、演奏者個々が持つ演奏の感覚を言語化してもらうために、無響室内で再現したホール音場においてインタビュー形式の演奏実験を行う(3.1.1項～3.1.5項)。予備実験で得られた語彙はKJ法的分類・整理によって言葉同士の関係性を見出し、演奏者にとって「演奏のしやすさ」はどのような言葉で表されるのかを調べる。これによって、2段階目として設定する「本実験」での音場の心理評価項目を個々の演奏者に定める(3.1.6)。本実験では予備実験同様の実験環境で演奏実験を行った後、それぞれのホールの再現音場について心理評価を行う(3.2.1項～3.2.6項)。本実験終了後は本実験結果の分析を行う。分析方法は統計分析ソフトウェア IBM SPSS Statistics (SPSS)を用いて心理評価結果の因子分析(最尤法)をした後、そこで得られた因子分析得点と音響物理指標の数値を重回帰分析することで、「演奏のしやすさ」を定量的に表し、その結果が妥当かどうかを検討する(4.1節～5章)。

3 演奏実験

3.1 予備実験

3.1.1 実験目的

予備実験では、演奏者の演奏感覚を言語化し、そこで得られた語彙から本実験で行う再現音場の心理評価に用いる評価項目を演奏者毎に設定すること、また本実験の前段階として、演奏者に普段の演奏環境とは異なる無響室内の立体音響装置を用いて再現された音場に適応させることを目的とする。

3.1.2 実験対象

絶対条件として「プロとして活動している演奏者」を対象とした。また、希望条件を「様々な演奏環境を経験していて、実験に耐えうる集中力をもっており、自身の演奏感覚を言語化することに長けている演奏者」とした結果、4人の演奏者の協力を得た。以下、表1に被験者の演奏楽器の種類、活動歴、主な活動形式を示す。また、以下よりヴァイオリンをVn、チェロをVc、トランペットをTp、指揮をCondと記す。

表1 予備実験被験者

名称	楽器	活動歴	活動形式
Vn1	Vn	3年	ソロ・室内楽 大学補助員
Vn2	Vn	30年	ソロ・室内楽・オーケストラ 大学非常勤講師
Vc	Vc	36年	ソロ・室内楽・オーケストラ
Tp	Tp & Cond.	47年	指揮者 その他 (Tp 奏者としての活動)

3.1.3 実験方法

実験の手順を以下に示す。

1. 無響室内に設置された立体音響装置内で再現音場のもと、被験者に演奏させる。
2. 演奏終了後、被験者にその場で実験者からのインタビュー（ex. 演奏していてどのように感じたか等）に答えさせる。その際、実験者はそのインタビューの内容をメモに残す。
3. 1～2を6種類のホール音場でそれぞれ行う。
4. 6種類のホール音場での演奏・インタビューが終わった後、実験者は自身の残したメモから演奏体験を表していると思われる語彙、またホールの音響の特徴を表していると思われる語彙を選別し、一つずつ付箋に書く。
5. 付箋を「評価語分類シート」に貼る。この際、被験者が各語彙の関係性について明確に意見をもっている場合は被験者に一任するが、迷っている場合は実験者が付箋に書かれた各語彙について被験者に詳細を尋ねながら、誘導する形式で貼る。
6. インタビューの際に残したメモ・付箋を貼られた評価語分類シート・インタビュー時の録音を参考に、実験者は被験者の演奏体験を自身でも理解するため、また本実験での心理評価のための語彙を選別するため、語彙の関係性をまとめ、評価語分類シートに清書する。
7. 各被験者においてまとめた評価語分類シートに書かれた語彙の中から本実験の心理評価項目に用いる語彙を選別する。まず対を為す言葉同士をピックアップし、次にそれぞれの類義語を探す。ホール音響の特徴を良く表していて本実験に有用だと思われるが、対を為す言葉がない語彙についてはその感覚の有無を尋ねることとする（ex. ホールが助けてくれる感じがある、ない等）。

また、予備実験の演奏曲については各演奏者に速く、動きのある曲と緩やかであり動きのない曲の2曲を演奏させた。演奏曲目は以下表2の通りである。

表2 演奏曲目

楽器	速く、動きのある曲名	緩やかで、あまり動きのない曲名
Vn1	ストラヴィンスキー作曲 組曲 「兵士の物語」よりタンゴ - ワルツ - ラグ前半	ドヴォルザーク作曲 「4つのロマンティックな小品」より第一曲目
Vn2	テレマン作曲 「無伴奏ヴァイオリンのための12の幻想曲」より9番2楽章	テレマン作曲 「無伴奏ヴァイオリンのための12の幻想曲」より9番1楽章
Vc	バッハ作曲 「無伴奏チェロ組曲」より第一番クーラント	エルガー作曲 「チェロ協奏曲」冒頭とチャイコフスキー作曲「感傷的なワルツ」の組み合わせ
Tp	アレクサンダー・ゲディケ作曲 「コンサートエチュード」	ジャン・コポー作曲 「トランペットとピアノのためのソナタ」より第一楽章サラバンド

3.1.4 再現音場・システムについて

次に、再現音場とシステムについて述べる。予備実験における実験システムは図24の通りである。再現音場は、まず3Dモデリングソフト「SketchUp2017」を用いて、図25～30に示すシューボックス型、ワインヤード型、五角錐型の3種類のコンサートホールを作成した後、音源位置をステージ上に、受音点をその30cm後方に定め、吸音率を表3～5のように設定し、各ホールのインパルス応答を求めた。インパルス応答は「2. 原理」で触れた、バックトレース法を使用して計算し、VBAPに基づいて6方向のスピーカー出力に振り分けた。得られたそれぞれのインパルス応答から直接音と機器の遅延を考慮した5ms分を削除し、実験においては再生ソフトウェア「Cubase 12 pro」において自作のリアルタイム畳み込みプラグインで演奏者の演奏音とインパルス応答の畳み込みを行い、演奏者に自身の演奏音と、実験システムからの出力、即ち音の「かえり」を聴かせることでホール音場を再現した。

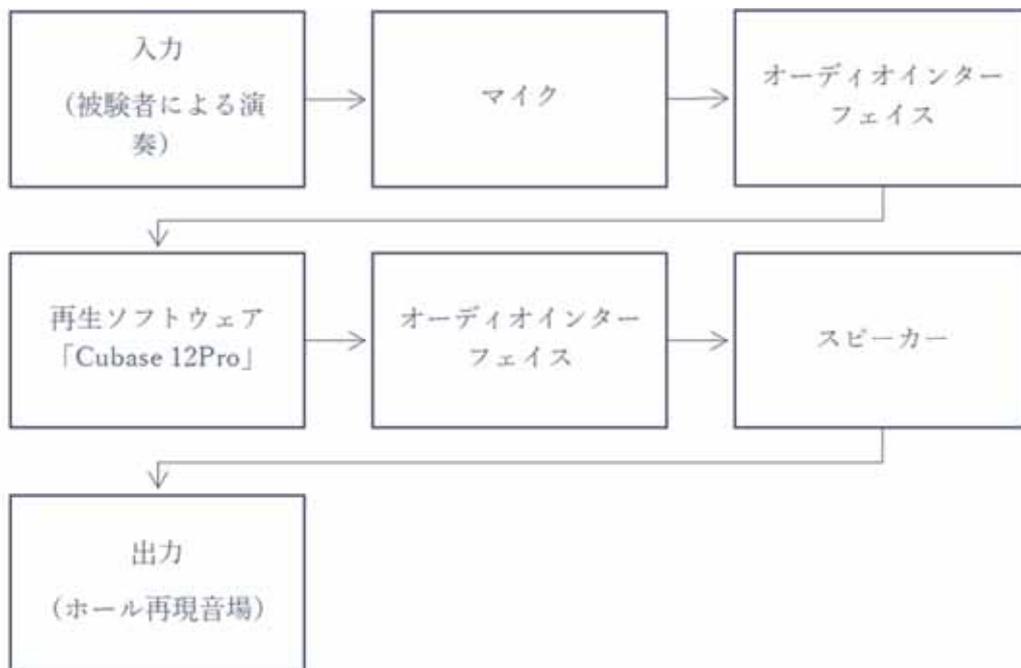


図 24 実験システム

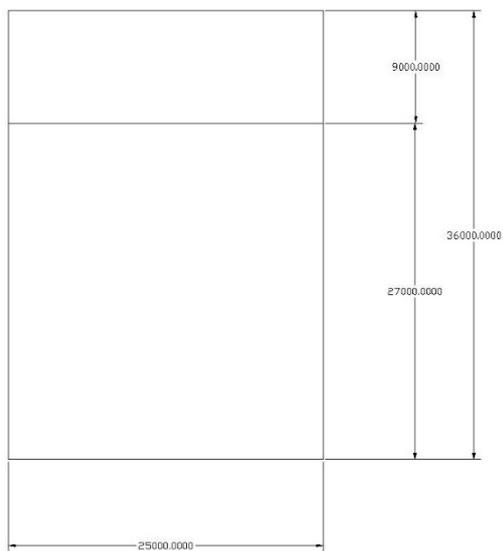


図 25 シューボックス型(平面図)

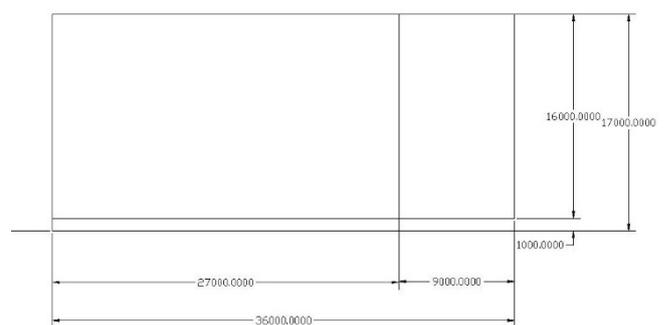


図 26 シューボックス型(断面図)

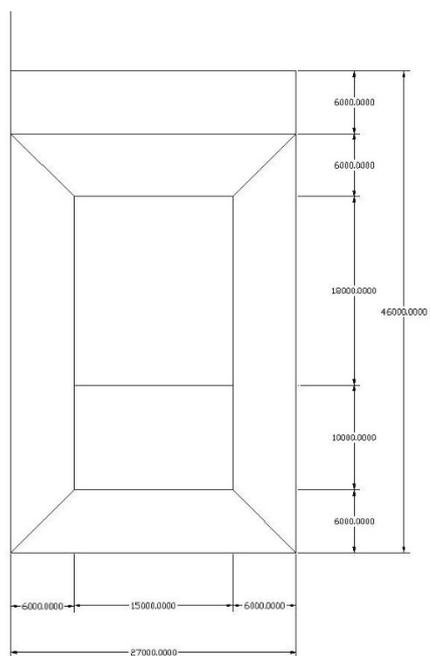


図 27 ワインヤード型(平面図)

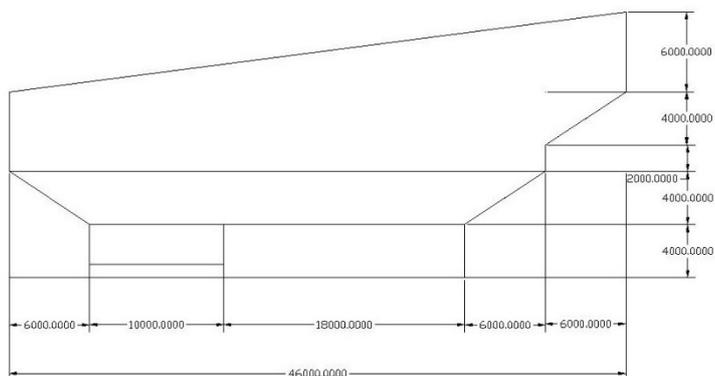


図 28 ワインヤード型(断面図)

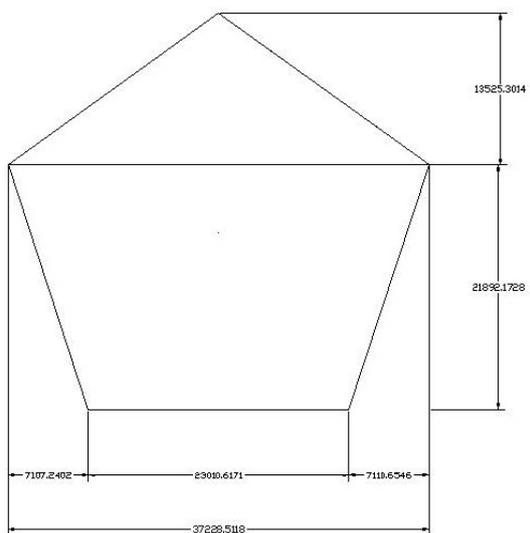


図 29 五角錐型(平面図)

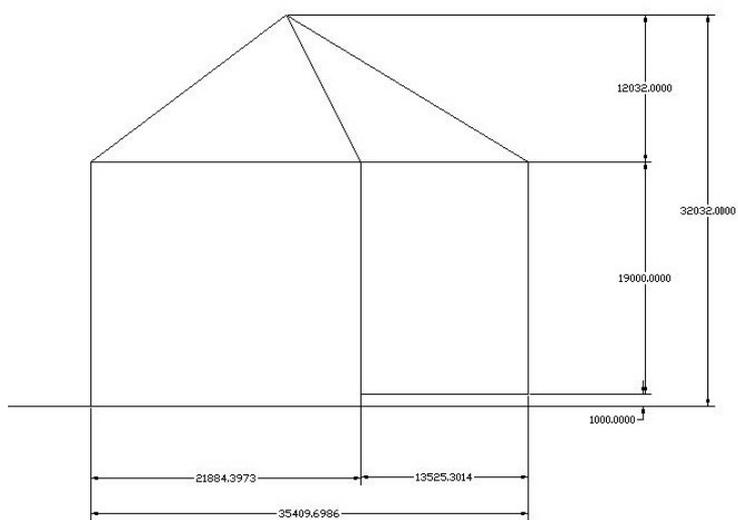


図 30 五角錐型(断面図)

表 3 シューボックス型の吸音率

シューボックス型	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
1 舞台	0.16	0.14	0.09	0.08	0.07	0.07
2 客席床	0.42	0.58	0.67	0.55	0.35	0.25
3 舞台周壁	0.12	0.1	0.06	0.03	0.04	0.05
4 客席側壁	0.08	0.36	0.22	0.15	0.15	0.16
5 客席後壁	0.7	0.8	0.6	0.55	0.35	0.25
6 天井	0.12	0.1	0.06	0.03	0.04	0.05

表 4 ワイヤード型の吸音率

ワイヤード型	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
1 舞台	0.16	0.14	0.09	0.08	0.07	0.07
2 舞台周壁	0.12	0.1	0.06	0.03	0.04	0.05
3 1階客席側壁	0.08	0.36	0.22	0.15	0.15	0.16
4 2,3階側壁	0.12	0.1	0.06	0.03	0.04	0.05
5 1,2,3階客席	0.42	0.58	0.67	0.67	0.68	0.69
6 2,3階後壁	0.7	0.8	0.6	0.55	0.35	0.25
7 天井	0.12	0.1	0.06	0.03	0.04	0.05

表 5 五角錐型の吸音率

五角錐型	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
1 舞台	0.16	0.14	0.09	0.08	0.07	0.07
2 舞台後壁	0.12	0.1	0.06	0.03	0.04	0.05
3 客席床	0.42	0.58	0.67	0.67	0.68	0.69
4 客席側壁	0.08	0.36	0.22	0.15	0.15	0.16
5 客席後壁	0.7	0.8	0.6	0.55	0.35	0.25
6 天井	0.12	0.1	0.06	0.03	0.04	0.05

実験における音量調整は2種類の方法で行った。一つ目の方法では、様々なホール音響設計を経験している音響設計実務者の耳によって適切だと思われる音量に調整した。二つ目の方法では計算で得られた数値をもとに音量を調整した。今回は二つ目の方法について詳細・手順を以下に示す。



図 31 立体音響システム①



図 32 立体音響システム②

1. 立体音響システムを起動する。
2. 図 31 のように騒音計とスピーカーを設置する。まずはスピーカーを騒音計の方へ向ける。
3. 2ch の 15 回の TSP 応答を測定する。立体音響システムを通過した応答ファイル名を backward_rf.wav とする。オーディオインターフェイスのみを通過した応答ファイル名を of.wav とする。
4. 図 32 のようにスピーカーをマイクの方へ向ける。
5. 1ch の TSP 応答を測定する。立体音響システムを通過した応答ファイル名を forward_rf.wav とする。
6. MATLAB で backward_rf.wav と forward_rf.wav を読み込み、それらを足し合わせたものを rf.wav とする。of.wav と rf.wav を用いて 15 回の同期加算を行い、インパルス応答を求める。出力されたファイルを ipls_measurement.wav とする。
7. 「MATLAB」で ipls_measurement.wav と ipls_prediction.wav を読み込み、それらの直接音位置と初期反射音位置を揃えた後、直接音と反射音の切り分けを行う。ここで、ipls_prediction.wav はバックトレース法を用いて対象ホールのステージ上に音源と受音点を置いた場合のモノラルのインパルス応答の計算結果である。この際、予測と実測の反射音の時間的なずれを検出する。初期反射音位置を揃える際はインパルス応答のスタート位置を調整して、反射音タイミングが重なるようにする。
8. 反射音の A 特性等価音圧レベルが立体音響システムからの反射音のそれと同じになるようシステムの音量を調整する。

立体音響システムの音量は音響設計実務者の耳で行った場合は入力を 30 dB、出力を -35 dB、数値的に音量調整した場合も入力を 30 dB、出力を -35 dB とした。ただし、ここで記載するレベルは後述するオーディオインターフェイスのコントローラーである Total Mix というソフトウェア上の設定値である。しかしながら Tp 奏者の実験の際には、入力である演奏音がかなり大きく実験システムからの出力においてビリつきが確認され、演奏感に影響が出ることが懸念されたため、前者の入力を 10 dB、出力を -15 dB とし、後者の入力を 20 dB、出力を -25 dB とした。

3.1.5 実験風景・使用機材

続いて、実験風景を図 33、34 に示す。また、使用した機材は図 35～図 37 に示す。



図 33 予備実験風景①

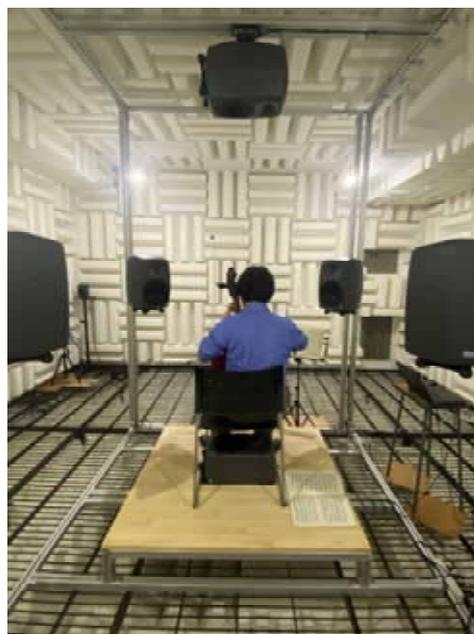


図 34 予備実験風景②

- ・コンデンサーマイク
AKG C414XLS



図 35 マイク

(<https://www.akg.com/microphones/condenser-microphones/3059X00050.html> より引用)

- ・オーディオインターフェイス
RME Fireface UCX II



図 36 オーディオインターフェイス

(<https://synthax.jp/fireface-ucx-ii.html> より引用)

・アンプ内蔵スピーカー

GENELEC 8050B スタジオモニター



図 37 スピーカー

(<https://www.genelec.jp/active-2-way-studio-monitors/8050b/>より引用)

3.1.6 実験結果（インタビュー結果を基にした個別尺度の設定）

実験結果として、各被験者における付箋を貼った状態の評価語分類シートとその後実験者がまとめた評価語分類シート、その中から語彙を選別して作られた本実験心理評価シートを図 38～図 49 に示す。



図 38 付箋を貼った状態の評価シート (Vn1)

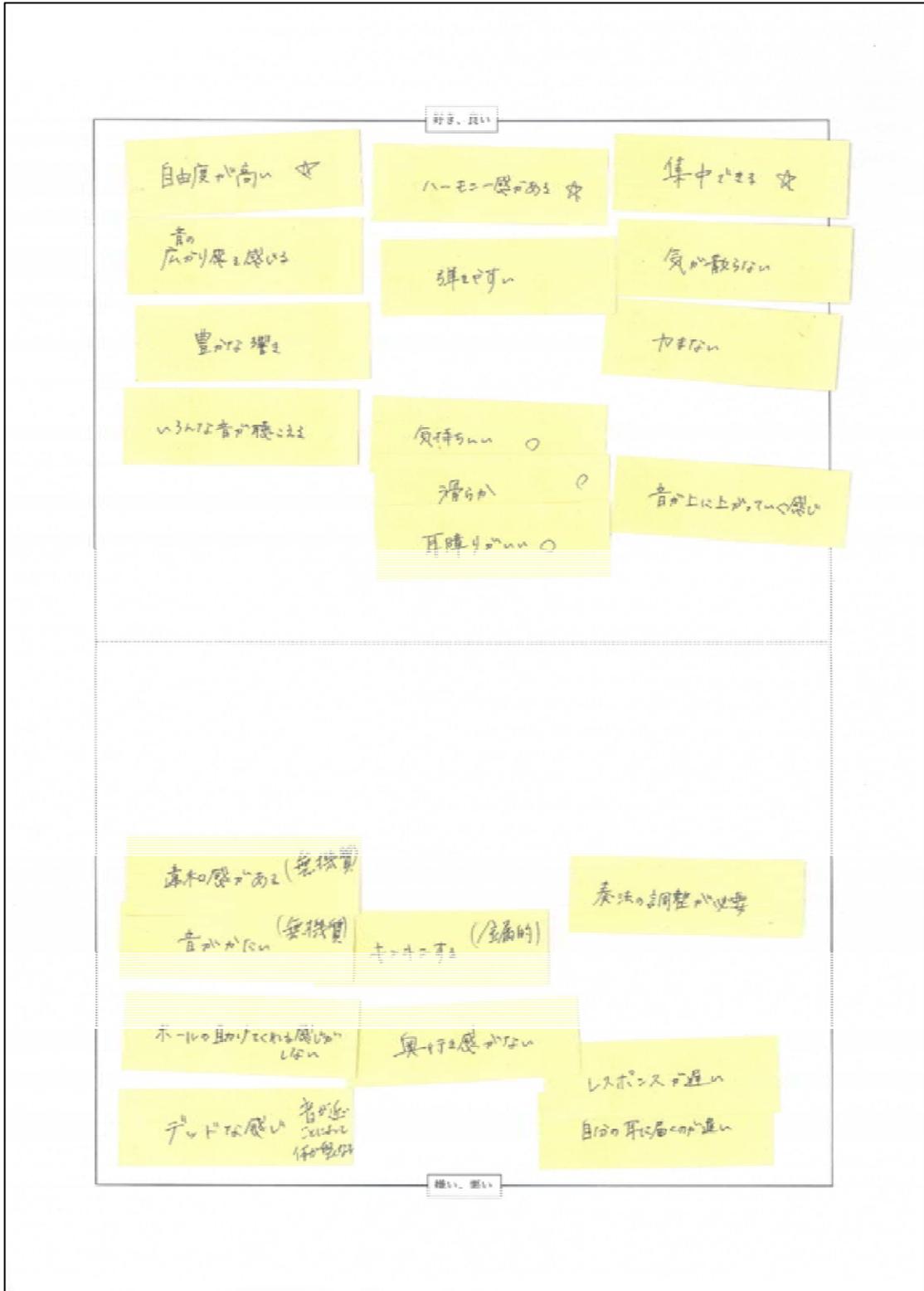


図 39 付箋を貼った状態の評価シート (Vn2)



図 40 付箋を貼った状態の評価シート (Vc)

- 響きの残る感じが早い → 早い ... 余韻が残る感じが早い → 早い
- 音がクリアに聴こえる感じが早い → 早い ... 音がクリアに聴こえる感じが早い → 早い
- ボウイングの一体感がある感じが早い → 音が固い、金属的 ... 響きの残る感じが早い → 早い



図 44 評価語分類シート (Vc)

本実験 心理評価シート
(Vn1)

1. 音節の長さについて

音節が良い 1 2 3 4 5 6 音節が早く弾ける 7

2. 音の印象について

音が直接的・ダイレクト 1 2 3 4 5 6 音が鋭鋭している 7

3. 残響感について

響かない 1 2 3 4 5 6 残響が多すぎる 7

4. 音の余韻について

余韻が逝断される感じ 1 2 3 4 5 6 響きが伝播していく感じ 7

5. 音の発音について

ぼやける 1 2 3 4 5 6 発音が良い 7

6. 音の粒立ちについて

悪い 1 2 3 4 5 6 良い 7

7. 総合評価

演奏しにくい 1 2 3 4 5 6 演奏しやすい 7

8. 自由回答欄

図 46 本実験心理評価シート(Vn1)

本実験 心理評価シート
(Vn2)

1. 音の結び感について

音の結び感がない 1 2 3 4 5 6 音の結び感がある 7

2. 音の豊かさについて

ゾクゾク感 1 2 3 4 5 6 ハーモニー感がある、豊か 7

3. ホールの響きが演奏を助けてくれるかどうかについて

助けてくれる感じがしない 1 2 3 4 5 6 助けてくれる感じがある 7

4. 音の質感について

全体的 1 2 3 4 5 6 滑らか、耳障りが良い 7

5. 演奏表現のしやすさについて

楽法の調整が必要 1 2 3 4 5 6 表現の自由度が高い 7

6. 演奏時の身体の緊張について

リラックスできない 1 2 3 4 5 6 リラックスできる 7

7. 総合評価

演奏しにくい 1 2 3 4 5 6 演奏しやすい 7

8. 自由回答欄

図 47 本実験心理評価シート(Vn2)

3.2 本実験

3.2.1 実験目的

本実験では、予備実験によって作成された演奏者毎の心理評価シートを用い、予備実験とは異なる実在のホール再現音場のもとで演奏実験を行うことで演奏者の演奏感覚、特に「演奏のしやすさ」を定量的に示すことを目的とする。

3.2.2 実験対象

本実験における実験対象は 3 種類の実在するコンサートホール（ウィーンミュージックフェライン大ホール、ボストンシンフォニーホール、アムステルダムコンセルトヘボウの 3 種。以下、それぞれ Vie、Bos、Ams と表示する）。をモデリングしたものである。以下、図 50～52、表 6～9 に 3 種のコンサートホールについて詳細を示す。

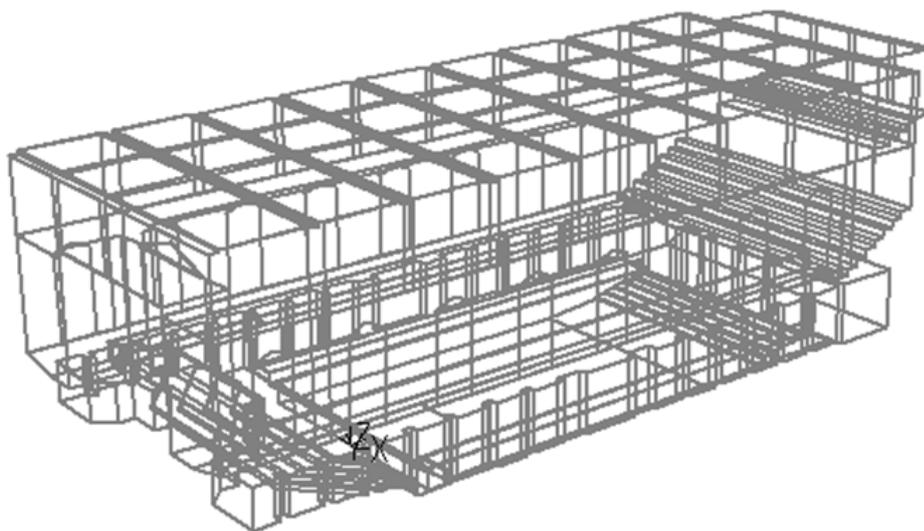


図 50 ムジークフェライン大ホール

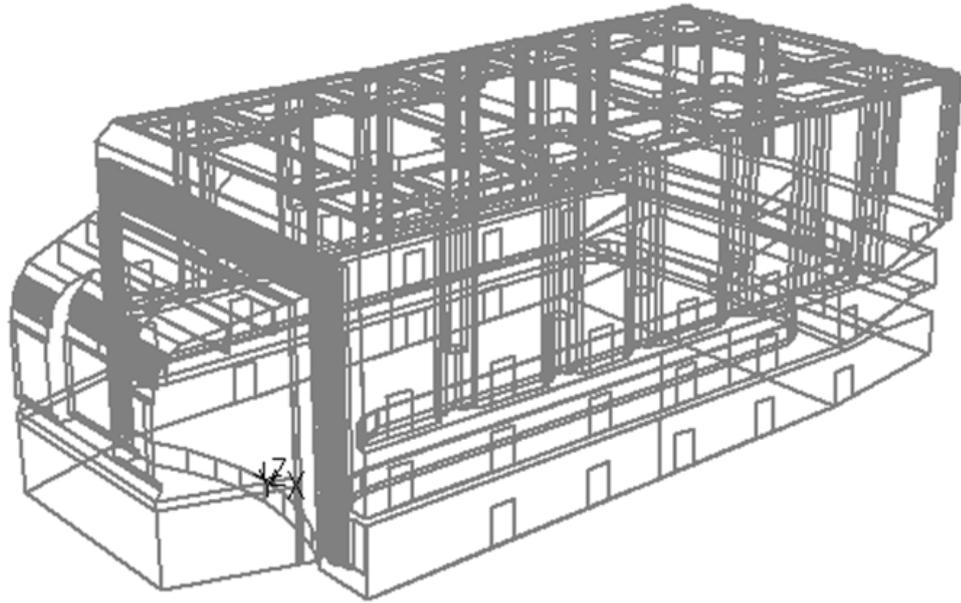


図 51 ポストシンフォニーホール

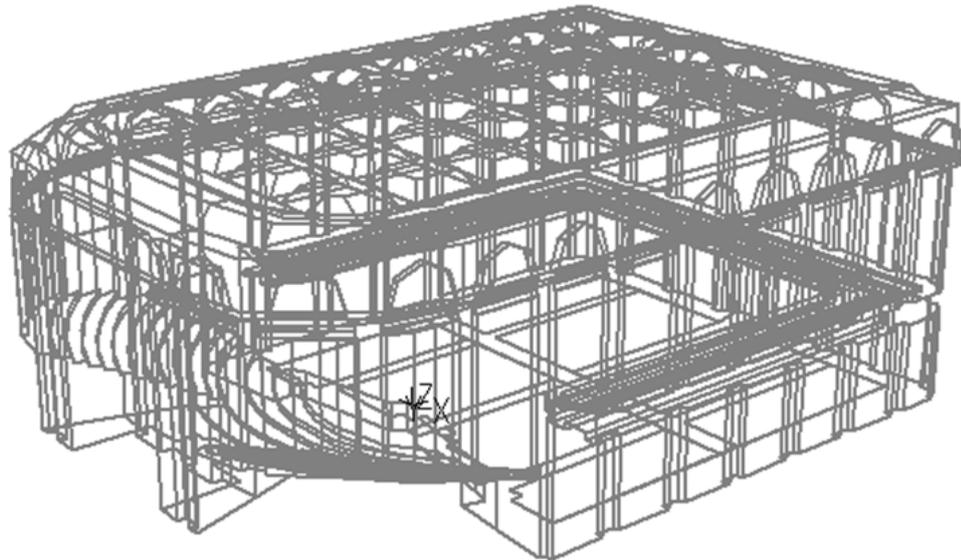


図 52 アムステルダムコンサートヘボウ

表6 コンサートホール詳細

コンサートホール	体積(m ³)	客席数
Vie	15000	1680
Bos	18750	2625
Ams	18780	2037

表7 吸音率 (Vie)

	部位	125	250	500	1000	2000	4000
1	客席床	0.42	0.58	0.67	0.67	0.68	0.69
2	手摺壁	0.12	0.1	0.06	0.03	0.04	0.05
3	舞台上床	0.16	0.14	0.09	0.08	0.07	0.07
4	一階側壁	0.12	0.1	0.06	0.03	0.04	0.05
5	一階後壁	0.12	0.1	0.06	0.03	0.04	0.05
6	バルコニー下天井	0.12	0.1	0.06	0.03	0.04	0.05
7	2階側壁・後壁	0.12	0.1	0.06	0.03	0.04	0.05
8	前壁	0.12	0.1	0.06	0.03	0.04	0.05
9	パイプオルガン	0.35	0.25	0.18	0.15	0.15	0.15
10	天井	0.12	0.1	0.06	0.03	0.04	0.05

表8 吸音率 (Bos)

	部位	125	250	500	1000	2000	4000
1	側壁	0.12	0.1	0.06	0.03	0.04	0.05
2	後壁	0.12	0.1	0.06	0.03	0.04	0.05
3	客席床	0.46	0.64	0.74	0.74	0.75	0.76
4	バルコニー下天井	0.12	0.1	0.06	0.03	0.04	0.05
5	手摺壁	0.12	0.1	0.06	0.03	0.04	0.05
6	天井	0.12	0.1	0.06	0.03	0.04	0.05
7	前壁	0.12	0.1	0.06	0.03	0.04	0.05
8	舞台天井・壁	0.12	0.1	0.06	0.03	0.04	0.05
9	パイプオルガン	0.35	0.25	0.18	0.15	0.15	0.15
10	舞台床	0.16	0.14	0.09	0.08	0.07	0.07

表9 吸音率 (Ams)

	部位	125	250	500	1000	2000	4000
1	手摺壁	0.12	0.1	0.06	0.03	0.04	0.05
2	壁	0.12	0.1	0.06	0.03	0.04	0.05
3	パイプオルガン	0.35	0.25	0.18	0.15	0.15	0.15
4	天井	0.12	0.1	0.06	0.03	0.04	0.05
5	客席床	0.43	0.6	0.7	0.7	0.71	0.72
6	ステージ床	0.16	0.14	0.09	0.08	0.07	0.07
7	バルコニー下天井	0.12	0.1	0.06	0.03	0.04	0.05

3.2.3 実験方法

実験の手順を以下に示す。

1. まず、演奏者にはホール再現音場に没入させるため、音源位置をステージ上に、受音点位置を客席においた場合のインパルス応答と弦楽四重奏のドライソースを畳み込んだ音源を聴かせる。音源の再生が終わった後、実験者は演奏者に各ホールについてどんな感想を持ったかを尋ね、メモを残す。
2. 次に、音源位置、受音点位置をともにステージ上に置いた場合の再現音場に切り替え、演奏者に演奏させる。この際、演奏させる楽曲は予備実験と同じものとする（無響室内に設置された立体音響装置内での演奏という特異な環境下での感覚を少しでも思い出させるため）。
3. 演奏終了後、実験者は演奏者毎に作成した心理評価シートを演奏者に渡し、ホール音場の評価をさせる。この際、順序効果の影響が出る恐れがあるため[1]、この時点での評価は最終評価の前段階とし、鉛筆を使用して○をつけさせる。
4. 1～3を他2種類のホールにおいても行う。
5. 最終評価前に、演奏者がもう一度体験したいと申告した再現音場に切り替え、体験させる。これは何回行っても良い。
6. 最後に、ボールペンを使用して○をつけさせ、最終評価を行う。

3.2.4 再生音場・システムについて

本実験において再生システムは「3.1.4 再生音場・システム」のものと同様であるため、そちらを参照されたい。再生音場については音響実務者から提供していただいた実在する3種のコンサートホールのモデル、及び吸音率を用いてバクトレース法により計算しインパルス応答を求めた。立体音響システムの音量は入力を30 dB、出力を-30 dBとした。

3.2.5 実験風景・使用機材

使用機材については「3.1.5 実験風景・機材配置図」と同様であるため、そちらを参照されたい。実験風景は図 53～図 61 に示す。

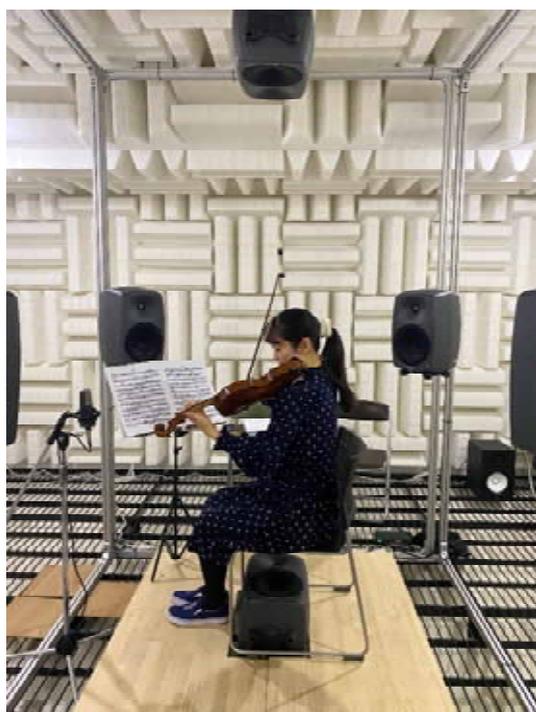


図 53 本実験風景(Vn1①)



図 54 本実験風景(Vn1②)

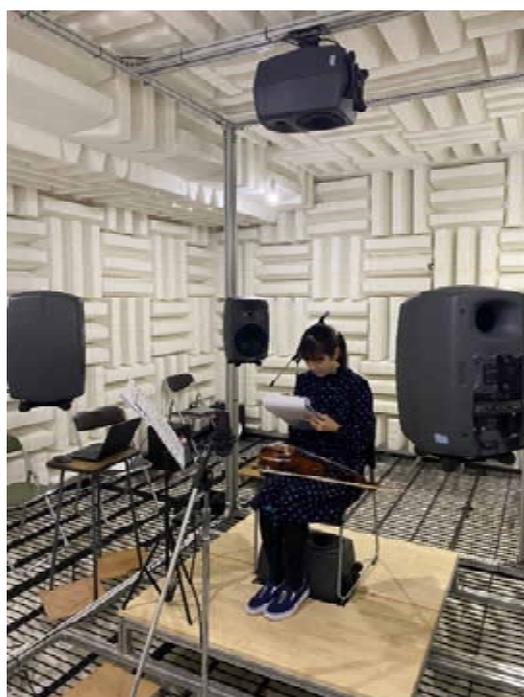


図 55 本実験風景(Vn1③)



図 56 本実験風景(Vn2①)



図 57 本実験風景(Vn2②)

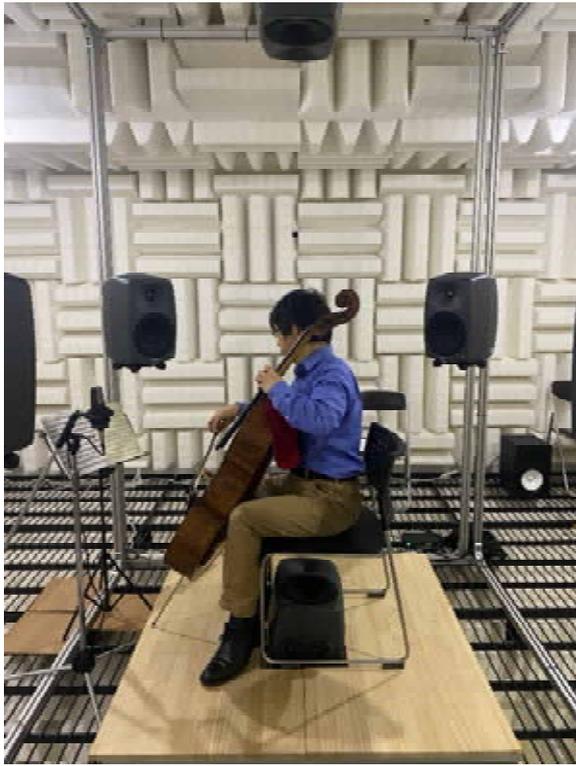


图 58 本実験風景(Vc①)

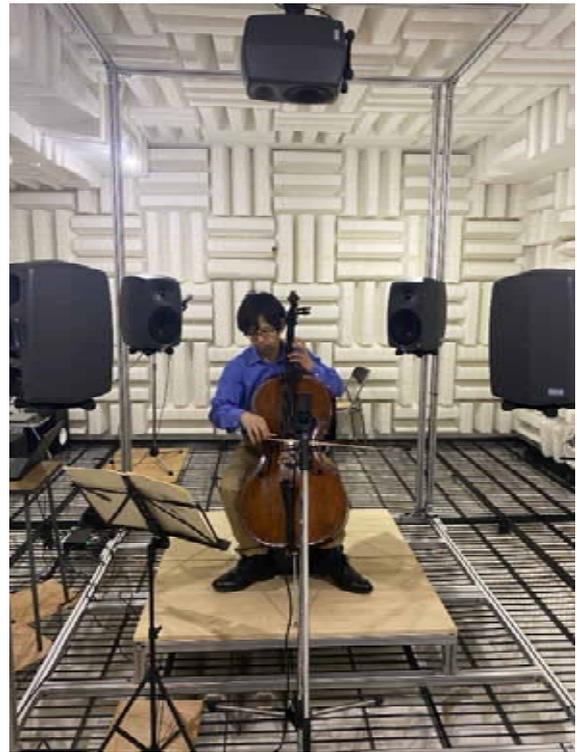


图 59 本実験風景(Vc②)

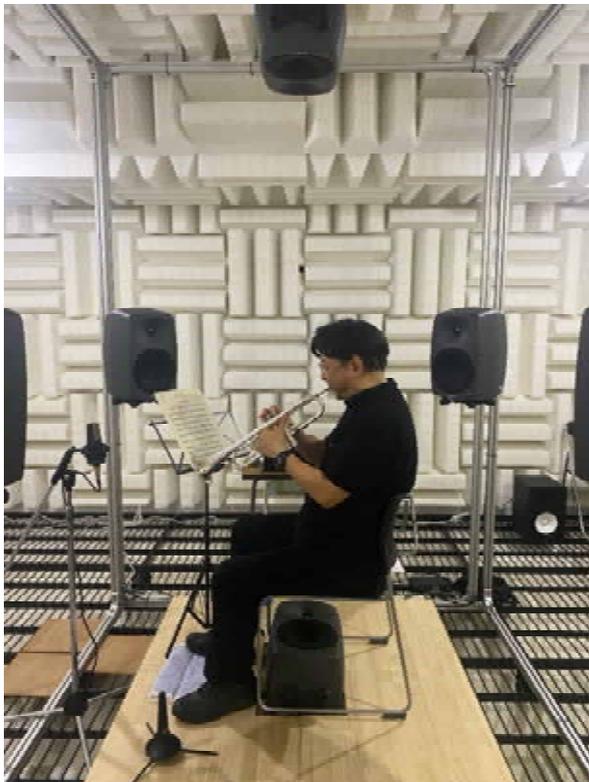


图 60 本実験風景(Tp①)

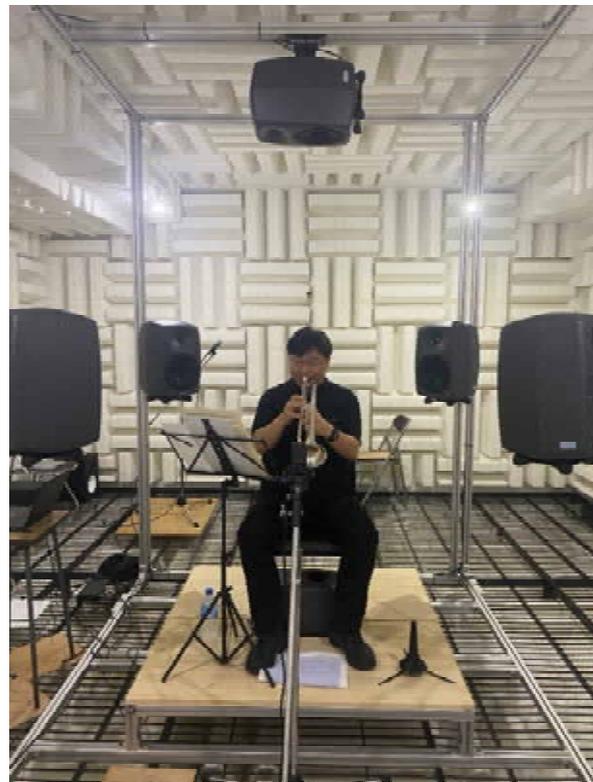


图 61 本実験風景(Tp②)

3.2.6 実験結果

本実験結果として、表 10 に心理評価結果を記載する。なお、自由回答は表 11～13 を参照されたい。

表 10 心理評価結果

楽器	評価項目	vie	bos	ams
Vn1	1 音価の長さ	6	3	3
	2 音の印象	4	4	3
	3 残響感	4	3	3
	4 音の余韻	3	5	5
	5 音の発音	6	4	4
	6 音の粒立ち	6	5	4
Vn2	1 音の拡がり感	6	5	6
	2 音の豊かさ	7	5	7
	3 ホールが助けてくれるか	6	5	7
	4 音の質感	6	3	7
	5 演奏表現	7	5	7
	6 身体の緊張	7	5	7
Vc	1 響きの手応え	6	4	6
	2 明瞭性	7	4	6
	3 かえり	4	6	4
	4 質感	6	6	6
	5 響きの長さ	5	3	6
Tp	1 音の明瞭性	7	6	6
	2 響きの長さ	5	3	6
	3 音の密度	7	3	6
	4 ホールが助けてくれるか	7	1	7
	5 演奏表現のしやすさ	7	4	3
	6 感覚	7	5	7

表 11 Vie に対する自由回答

楽器	自由回答
Vn1	D線のある所から響かなくなり、直接的で生っぽい音になる。高音になるにつれて響かなくなる感じがする。客席で聴いたときよりも響き過ぎない印象を持った。
Vn2	すごく弾きやすい。ゲネプロとしての感じがする。お客様の割合を聞いて、計算して弾いてもよく響くので不安感がない。安心感。ただ音が混ざりすぎてしまうので粒立ちを意識して弾いていた。一番ハーモニックで、宗教曲やブルックナーが合いそう。教会で弾いているような敬虔な感じで、静粛さを持ち合わせていないと弾けないようなイメージを抱いた。
Vc	より質の良い響きに変化していく感じがある。相乗効果がある感じ。客席にいたときよりも残響の長さが短い感じがする。非常に適度。お客様が入ったらもう少しデッドになるだろうから、残響がもう一段階長いといいのではないかと思った。総合的に良い響きの場所のように感じられる。
Tp	期待感を上回る響きの良さ。響きが助けてくれる、ホールがより演奏の高みを見せてくれる感じ。演奏が理想の形で再現されるように感じた。自分の音に少しお化粧してもらえそうな、助けられる感じがしてモチベーションにつながる。ホールの響きによって随分と楽できる、具体的にはゆっくりした曲を吹いたときに少し短めに吹いていいように感じた。気持ちが緩いとホールの響きに甘えてしまっただけでズルをしてしまいそう、対応力が必要。粒立ちがなかったり、干渉することもない。高い方の音が上に伸びていく感じで快感。

表 12 Bos に対する自由回答

楽器	自由回答
Vn1	Vie よりも弾きやすかった。全体的にまんべんなく、響き過ぎず、でもちゃんと響きはありつつ、といった感じ。普通に弾いている分にはちょうどいいが、繊細な音の表現が難しそう。音の立ち上がりは良く、重音が弾きやすい。
Vn2	普通に響き感じ。ウィーンに比べてハーモニー感がない。現代的な響きの質で、粒が聴こえやすいがプラスαの感じはしない。響きがまとまっているのでテンポを速く弾けるし、音がよりクリアに届くように感じる。ウィーンとホールのコンセプトが全然違うように感じた。(こちらの方が演奏しやすいように設計されていると感じた。)現代曲が合いそう。
Vc	残響の長さが短いので、音の粒ははっきりする。音の響きの長さは悪くはないが、音のかえりが物足りない。ムジークフェラインとホールの容積が一緒な感じがする。(響きは違うが、ハコの大きさが同じように感じる。)より楽器の生の音色が出ているような感じで、音色の質が変化せずに客席に届くという点では良いが、手応えがもう少しあるとよい。クラシック専用ホールではなく多目的ホールのようなイメージ。お客様が入るとよりデッドになるのではないかと思う。
Tp	響き自体は美しいがオーディションに出ている感じ。正確に演奏すればその通りに響いてくれる、正直で欠点を隠せない感じ。響きがタイトでプレッシャーがかかり、演奏に集中できない。練習だったりアンサンブル用なら最高の環境だが、本番としてはストレスに感じそう。響きに邪魔される感じはない。

表 13 Ams に対する自由回答

楽器	自由回答
Vn1	客席で聴いているときよりも時差は少ない。ただ低音の弾き方が難しく、気を付けていないと前の音と被さってしまう。聴いている時は響きが散漫しているように感じたが、弾いている分には感じなかった。
Vn2	いろんな音が聴こえる。機能性に優れている。めちゃくちゃ弾きやすい。響き過ぎないが、響きはちゃんとあるし、良く響く。バランスが良い。前に体験した2つのホールのいいとこどりの感じで、ホールが響かせ方を教えてくれる感じがする。
Vc	残響が長く和声と和声が被りそうで心配になるため、ソロや室内楽ならば問題ないが楽器が増えるとリスクが高くなる恐れがある。弾いていて満足感があり、心地がいい。音の質感は変わらずに客席に届く感じがする。特定の音だけ共振してしまい、その音がピックアップされて聴こえて気になった。
Tp	想像とは逆でめちゃくちゃ良かった。ステージに立つとホールがたすけてくれる感じがした。音を綺麗にして届けてくれる、響きの利用が大事になりそう。快感に近い。ただ響きが豊か過ぎてコントロールが必要。(ウィーンをもう一度体験してからはあんまり良くなかった。)

4 結果

4.1 本実験分析方法

本実験結果の分析方法について述べる。本実験結果の分析においては、まず始めに、因子分析をするため各演奏者の心理評価項目を物理指標点数に置き換えた。置き換え方法としては、予備実験で得られたインタビュー内容から、表 10 における各心理評価項目に対応する物理指標をストレングス (strength)、クラリティ (clarity)、残響時間 (RT)、初期残響時間 (EDT)、初期側方エネルギー率 (LF)、時間重心 (Ts) の中から実験者が選び、その平均を取って各物理指標の点数とした。表 14 に心理評価と物理指標の対応を、表 15 に物理指標の得点を示す。表 14 の数値は表 10 の評価項目番号である。

表 14 心理評価と物理指標の対応

	Vn1	Vn2	Vc	Tp
strength	2, 6	2, 3, 4, 5, 6	1, 4	4, 5, 6
clarity	1, 2, 5, 6	2, 3, 4, 5, 6	1, 2, 4	1, 4, 5, 6
RT	1, 2, 3, 4, 5, 6	1, 2, 3, 5, 6	1, 2, 4, 5	2, 4, 5, 6
EDT	1, 2, 3, 4, 6	1, 4, 6	1, 2, 3, 4	3, 4, 5, 6
LF	2, 3, 5	1, 2, 3, 5, 6	1, 2, 3, 4	1, 2, 3, 4, 5, 6
Ts	1, 2, 3, 4, 5, 6	1, 2, 3, 4, 5, 6	1, 5	1, 2, 4, 5, 6

表 15 物理指標得点

		vie	bos	ams
Vn1	strength	5.00	4.50	3.50
	clarity	5.50	4.00	3.50
	RT	4.83	4.00	3.67
	LF	4.60	4.00	3.60
	EDT	4.67	3.67	3.33
	Ts	4.83	4.00	3.67
Vn2	strength	6.60	4.60	7.00
	clarity	6.60	4.60	7.00
	RT	6.60	5.00	6.80
	LF	6.33	4.33	6.67
	EDT	6.60	5.00	6.80
	Ts	6.50	4.67	6.83
Vc	strength	6.00	5.00	6.00
	clarity	6.33	4.67	6.00
	RT	6.00	4.25	6.00
	LF	5.75	5.00	5.50
	EDT	5.75	5.00	5.50
	Ts	5.50	3.50	6.00
Tp	strength	7.00	3.33	5.67
	clarity	7.00	4.00	5.75
	RT	6.50	3.25	5.75
	LF	7.00	3.25	5.75
	EDT	6.67	3.67	5.83
	Ts	6.60	3.80	5.80

4.2 分析結果① (因子分析)

続いて、因子分析（最尤法、プロマックス回転）を行った。因子分析とは、対象とする複数の変数に対して共通に影響を与えている「何か」を見つけるための分析方法であり、主に心理学で用いられる。本研究で因子分析を行った理由としては、既往研究である上野[1]の研究を参考に予備実験、および、本実験を行ったため、分析方法もその方法に則るべきと考えたからである。しかしながら、上野は因子分析の中でも抽出法に主成分法、および、回転法にバリマックス回転を採用しているのに対し、本研究では抽

出法に最尤法、および、回転法にプロマックス回転を採用した。主成分分析法とは数学的に標準化された主成分分析と同じであり、バリマックス回転とは「得られた因子間に相関がないことを仮定するため、軸が交わる点を原点として原点を中心に回転させることで因子と顕在変数の関係を見出しやすくする」回転法である[9]。それに対し、最尤法とは手元にあるデータをもとに、母集団において最もありえそうなモデルを推定する方法である。プロマックス回転は斜交回転の一つであり、因子間の相関があることを想定した回転法で、バリマックス回転よりも単純構造解を求めやすいものとなっている。因子分析と主成分分析はよく似ているために混同して考えられやすいが、主成分分析は各顕在変数に共通の部分のみを取り出し、新しい情報のまとめ、つまり新しい因子を作り出すものであり、因子分析は各顕在変数の背後にある共通の要因を探る、すなわち、各顕在変数に既に内包されている共通因子は何かを突きとめる分析方法である。そのため、本研究では複数の物理指標に共通に影響を与えている何か、即ち「演奏のしやすさ」と思われるものを見つけるために因子分析（最尤法、プロマックス回転）を採用した。分析はSPSSで行った。以下、表16～19、図62に因子分析結果を示す。

表16 因子分析結果(分散)

因子	初期の固有値			抽出後の負荷量平方和		
	合計	分散の%	累積%	合計	分散の%	累積%
1	5.754	95.905	95.905	5.698	94.966	94.966
2	.131	2.186	98.090			
3	.045	.757	98.847			
4	.039	.656	99.503			
5	.022	.373	99.876			
6	.007	.124	100.000			

因子抽出法: 最尤法

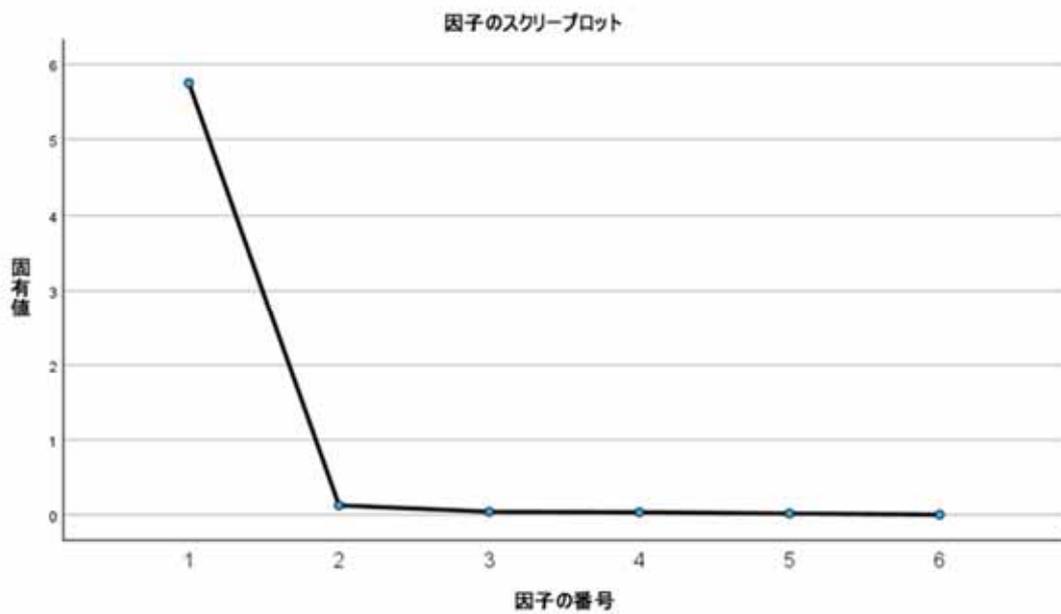


図 62 因子のスクリープロット

表 17 因子分析結果

変数	第1因子	共通性
	演奏のしやすさ	
strength	0.990	0.980
EDT	0.984	0.955
RT	0.978	0.957
clarity	0.977	0.969
LF	0.976	0.953
Ts	0.940	0.884
因子寄与	5.698	5.698
寄与率	94.966	94.966

注：最尤法、プロマックス回転

表 18 因子得点係数行列

因子得点係数行列	
strength	0.324
clarity	0.143
RT	0.149
EDT	0.208
LF	0.135
Ts	0.053

表 19 因子分析による演奏のしやすさ得点

	vie	bos	ams
Vc	6.01	4.82	5.90
Tp.&Cond.	6.92	3.54	5.81
Vn2	6.64	4.77	6.96
Vn1	4.97	4.14	3.55

表 20 心理評価による演奏のしやすさ得点

	vie	bos	ams
Vc	7	4	5
Tp. & Cond.	7	2	5
Vn2	7	5	7
Vn1	6	4	3

まず因子の抽出について、今回は固有値が1以上のもの限定して抽出を行ったため抽出された因子は一つだけであった。図 62 のスクリープロットを見ても、固有値の減少が小さくなる手前までの因子を抽出するのが一般的であるため一つの因子を採用するのが妥当だと判断できる。そのため、今回軸の回転は行われなかった。表 16 の「分散の%」という項目は寄与率を表しており、今回採用する第一因子は初期の固有値において 95.905%、因子抽出後の負荷量平方和においては 94.966%と非常に高い値となっている。以下、この第一因子を「演奏のしやすさ」として考える。

続いて、表 17 の因子分析結果について、因子負荷量を見るとどの物理指標においても値が大きく、「演奏のしやすさ」という共通因子が大きく影響を与えていることが分

かる。共通性とは、顕在変数のうち共通因子によって説明される割合のことであり、この値が高いほど抽出された因子との関係が深くなる。共通性の最大値は基本的に 1 であるため、今回の結果ではどの顕在変数においても非常に高い値を取っており、各物理指標と演奏のしやすさは深く関係していることが分かる。

表 18 は分析によって得られた因子得点係数行列である。これらの値を各物理量の係数として各物理指標得点にかけ合わせることで、各演奏者にとっての「演奏のしやすさ」得点を計算することができる。その結果が表 19 であり、表 20 の本実験心理評価時に演奏者がつけた総合的な「演奏のしやすさ」心理評価得点と比較すると、各演奏者におけるホルンの弾きやすさの順位がほぼ一致したためこの因子分析は妥当なものであったと判断できる。

この因子分析によって各物理指標得点から演奏のしやすさ得点を算出することは可能になったが、設計現場に適用するにはまだ計算する手間が大きく、現実的ではない。例えば設計現場で演奏のしやすさ得点を出すには物理指標の得点が必要になるので毎回インタビューを含んだ演奏実験を行わなければならないことになる。そこで次に重回帰分析を行うことで、演奏のしやすさと物理指標の重回帰式を得ることを目標とした。

4.3 分析結果②（重回帰分析）

次に、因子分析で得られた因子分析得点結果を目的変数、各物理指標を説明変数とし、重回帰分析を行った。重回帰分析とは、複数の説明変数が、目的変数にどのくらい影響を与えているのかを調べるための分析方法である。重回帰分析を行った目的としては、先にも述べたが重回帰分析で得られる各説明変数の係数を以って演奏のしやすさを定式化できるのではないかと考えたためである。重回帰式はインパルス応答から得られる物理指標の計算値をそのまま式に代入できるため、演奏のしやすさを簡単に算出することができ、設計現場での比較・検討段階において非常に有用な式になると考えられる。

重回帰分析は強制投入法により行った。以下、表 21 に重回帰分析結果を示す。

表 21 重回帰分析結果

	b	S.E.	β
定数	-141.698	61.322	
strength	14.098	5.895	0.609
LF	345.505	303.441	0.29
R ²	0.421		
自由度調整済み R ²	0.293		
自由度	2		
n	12		

表 21 において、b は偏回帰係数、S.E. は標準誤差、 β は標準化偏回帰係数である。強制投入法により重回帰分析を行ったが strength、LF 以外の変数は除外された。すなわち、このモデルにおいて「演奏のしやすさは strength と LF の二つで完全に予測できる」という結果が出たことになる。これは残響時間が演奏のしやすさに関係しないという直観的に信じがたい結果である。しかしながら、このモデルの検定結果の有意確率は 0.085 であり、有意水準 0.05 以上となったためにこのモデルは統計的には十分に有意ではないと判断される。

4.4 考察

本研究において、最終的に物理指標と演奏のしやすさの重回帰式を得ることを目標としていたが、重回帰式分析の結果が有意にならず、妥当な式を得ることはできなかった。これは、そもそも重回帰分析において考慮される説明変数はケース数、本研究では本実験のホール数に依存し、最大で「ケース数 - 1」個であることが事前に考慮されていなかったからである。仮にケース数を適当に増やして重回帰分析を行った場合、全ての変数は考慮されることが確認されているため、本実験で扱うホールの数を最低 7 つに増やすことで妥当な重回帰式が得られると考えられる。

しかし、もし本研究でホールの数を増やし、重回帰式を得られたとしても、まだ本研究には大きく二つの懸念点が存在する。一つ目は、本実験の因子分析における物理指標得点の算出方法である。本研究では各演奏者の心理評価項目がどのような物理指標で構成されるのかを実験者が予備実験でのインタビュー内容から判断し、それらを足し合わせ平均を取るといった方法を取った。実験者は予備実験でのインタビューによって演奏者の演奏感覚を完璧にとは言えないが、理解できたという仮定のもと、この方法を取ったが、容易であるものの、実験者の主観によって値が変わり得るやや強引な方法

であり、この方法が正しかったのかどうかは判断しかねる。

二つ目の懸念点は、本実験で扱った実在のコンサートホールのモデルが全て「質の良いもの」であったことである。今回、本実験ではウィーンムジークフェラインザール、ボストンシンフォニーホール、アムステルダムコンセルトヘボウと、世界三大シューボックスホールと呼ばれるホールを取り扱った。それぞれ個性的な特徴はあれど、全て音響が良いと言われるホールであり、今回質の悪い（所謂、弾きにくいと言われる）ホールは扱っていない。そのため、因子分析の精度の点において、今回の結果は質の悪いホールを扱った場合よりは劣るのではないかと推測される。この二つの懸念点を解決するには今後、本実験で扱うコンサートホールを少し弾きにくいと言われるような多目的ホールを含める等、量と質にバラエティを持たせ、同じ方法で因子分析を行い、妥当性を検討することで前者においてはこの方法が良かったのかどうかを検討する必要があるが、後者においては精度が高まるのかを検討する必要があると考えられる。

また、立体音響装置や音量調整についても更なるブラッシュアップが必要だと考える。今回立体音響装置は VBAP の原理を用いて実装したが、自身が立体音響装置を実際に体験した際、上から下に音像を移動していく間にパソコンでの音像位置の移動操作と体感の音像移動に若干のタイムラグ（上～目の前に下がっていくときよりも目の前～下に下がっていく方が少し早い）が生じていたように感じた。これが演奏実験にどう影響を与えていたのかは不明であるが、精度の向上として取り組むべき課題だと考える。音量調整については予備実験において二つの方法で行ったが、音響設計実務者の耳で行う方法は音響設計実務者に実験環境へ来てもらわなければならない手間や、またその信頼性が懸念点である。一方で数値的に音量調整を行う方法は理論的に信頼性が高いものの、周波数特性まで同様の方法で調整した場合には実際に聴いてみるとキンキンとした金属音のような感じが確認され、実際演奏者の評価は高くなかった。今回予備実験は演奏者から多様な語彙を引き出すために行ったため結果として問題はなかったが、本実験では再現音の質に、そして演奏者の評価に大きく影響を与えるため、こちらも検討が必要である。

5 結論・今後の展望

本研究では、「演奏のしやすさ」は物理指標とどのように結びついているのかを因子分析で調べ、さらにその関係性を定式化するため重回帰分析を行ったが、本実験において扱うホール数が少なく、妥当な式を算出するには至らなかった。しかしながら、本研究における実験方法や分析の流れは、細部において検討が必要であるものの、概ね妥当なものであると考えられる。

本研究では対象とした演奏者は4人であるため、もし重回帰分析で扱うホール数を増やせていたとしても、算出できた式が一般に適用できる「演奏のしやすさ」の式であるとは言い難い。しかし今後、後の音響研究者たちが対象とする演奏者を量的にも質的にもバラエティを持たせることで「演奏のしやすさ」は、近い将来、容易に算出可能になるであろうと期待する。

参考文献

- [1] 上野佳奈子, “ホール音場に対する演奏家の評価に関する研究”, 東京大学博士論文, 2002.10.
- [2] M. Vorländer, “Simulation of transient and steady-state sound propagation in rooms using a new combined ray-tracing/image-source algorithm”, J. Acoust. Soc. Am. 86, 172-178, 1989.
- [3] 豊田政弘, “建築音響物理学”, 関西大学出版部, 2023.
- [4] 小林愛佳, “幾何音響理論の改善”, 関西大学卒業論文, 2019.
- [5] S. Borish, “Extension of an image model to arbitrary polyhedra”, J. Acoust. Soc. Am. 75, 1827-1836, 1984.
- [6] V. Pulkki, “Virtual Sound Source Positioning Using Vector Base Amplitude Panning”, J. Audio Eng. Soc. 45, 456-466, 1997.
- [7] A. D. Blumlein, U.K. patent 394 , 325, 1931. “Re-printed in Stereophonic Techniques”, Audio Engineering Society, New York, 1986.
- [8] B. B. Bauser, “Phasor Analysis of Some Stereophonic Phenomena”, J. Acoust. Soc. Am. 33, 1536-1539, 1961.
- [9] D. M. Leakey, “Some Measurements on the Effect of Interchannel Intensity and Time Difference in Two Channel sound Systems”, J. Acoust. Soc. Am. 31, 977-986, 1959.
- [10] 林雄亮, 苫米地なつ帆, 俣野美咲, “SPSS による実践統計分析”, オーム社, 2017.

謝辞

本研究の遂行にあたり指導教官として終始多大なるご指導を賜った、関西大学環境都市工学部建築学科の豊田政弘教授をはじめとして、豊富な知識と経験のもと、研究計画段階からご助言を賜り、音量調整にもご協力いただいた音響デザイン研究所の荒木邦彦先生、安井千絵先生、快く実験にご協力いただき、多くの知見を与えてくださった植田麻未先生、藏野雅彦先生、佐藤一紀先生、林口真也先生に厚く御礼申し上げます。