ステージ上の反射音構造がオーケストラ指揮者に対して与える影響

- 指揮者を対象としたステージ音響設計に関する基礎的研究 -

AN INFLUENCE OF ACOUSTIC STRUCTURE ON ORCHESTRA CONDUCTOR

- A basic study on stage acoustic design for conductor -

徳永泰伸*, 寺島貴根**

Yasunobu TOKUNAGA and Takane TERASHIMA

The purpose of this study is to understand the characteristics of optimum acoustic condition for an orchestra conductor on the stage. In this paper, as the first step of this study, by using model sound field, experiments to measure the subjective easiness of conducting were carried out and following results were obtained.

1. Easiness of conducting is influenced by reverberation time and the optimum value is different from performer and audience.
2. Easiness is also influenced by long path echo (LPE) and easiness is reduced by the detectability of echo. But some conditions can be accepted despite detectable.
3. In the combined condition of reverberation and LPE, LPE dominantly influences on the easiness.
4. Performer and conductor differently evaluate the easiness in the same stage acoustic condition.

Keywords : Orchestra, Stage acoustic, Conductor, Subjective experiment, Reverberation, Long Path Echo

オーケストラ, ステージ音響, 指揮者, 主観評価実験, 残響, 後期反射音

1. はじめに

1.1 研究の背景

コンサートホールは音楽を聴くための建築であると同時に音楽が演奏されるための空間でもある。聴くための音環境はもちろんのこと、舞台上の演奏環境を整備することにより、演奏者の本来の能力を十分に発揮させ、高い品質の音楽を聴衆に対して提供することも重要である。このように音楽空間においては聴衆側のみならず演奏者側に対する音響条件が整備されていることが望ましいが、これら条件は必ずしも一致せず、同一空間内で共存させることは難しいため、これまでの音響設計においては聴衆側に対してのみ主眼が置かれてきた。そしてこれまでステージ上の演奏環境に対して十分な配慮がなされてこなかったのは、この分野に関する研究成果が多くな、実務設計に反映できる資料がいまだに十分に蓄積されていないことが一因であり、ホール音響設計分野の大きな課題として残されている。国内では音楽専用ホールが建てられるようになり、今日の高度な音楽文化の普及をかんがみるとこの課題の解決は急務であると思われる。

1.2 既往の研究と本研究の位置づけ

音楽用ホール等におけるステージ上の音響に関する研究では、初期のものとして Harkness の業績が挙げられる。Harkness はステージ音響設計の重要性を示唆するとともに¹⁾、ステージおよびオーケストラピットにおける演奏環境の改善を目的として、吸音体や拡散体

の設置を提案している²⁾。以来、ステージ音響の重要性が認識されるとともに様々なアプローチによってその音響設計法が研究されてきている。なかでも演奏者のステージ音場に対する主観評価に関連する聴感的・音響心理的な研究としては、以下のものが挙げられる。Marshall 等は声楽家に関してステージ音響構造と演奏のしやすさの関連性解明を目的とする被験者を用いた実験室実験を行っており、ステージ音場に対する声楽家の聴感印象には初期反射音よりも残響音の影響が大きいことを明らかにしている³⁾。また、Gade は指揮者・演奏者を含む32人の音楽家に対するヒアリング調査を行っており⁴⁾、この中で Gade は指揮者が指揮を行う上で Hearing each other が重要な音響的要因であることを示唆している。さらに Gade は実験室実験の結果をもとに、演奏環境に対する客観的指標として反射音のサポート感に関連する ST および演奏者同士のコミュニケーションの度合いに関連する EEL の提案を行っている⁵⁾。

一方国内において、中山等はソロ演奏者および独唱者に対してシミュレーション音場を用いた主観評価実験を行っており、演奏者に対する残響成分を含む音響構造の好ましい条件は楽曲によって異なること⁶⁾、歌唱に対する後期反射音の許容範囲等を明らかにしている⁷⁾。さらに中村等は声楽家に対して残響時間の異なる複数の室を用いてホールからのはね返り音に関する主観評価実験を行っており、好ましいはね返り音の強度および遅れ時間の条件と残響時間の関連性を明らかにしている。この中で残響音と後期反射音の相互関

* 三重大学大学院工学研究科 大学院生・修士(工学)

** 三重大学大学院工学研究科 准教授・博士(工学)

Graduate Student, Graduate School of Engineering, Mie Univ., M. Eng.

Assoc. Prof., Graduate School of Engineering, Mie Univ., Dr. Eng.

係を考慮することの必要性を指摘している⁸⁾。

木村等はさまざまな舞台形状におけるステージの音場を、仮想音源分布を用いたシミュレーションにより再現し、ソロおよびアンサンブル演奏に対して主観評価実験を行っている。ソロ演奏においては「演奏のしやすさ」に対する反射音の到来方向別の寄与を⁹⁾、アンサンブル演奏においては演奏者間のMTFの有効性を明らかにしている¹⁰⁾。また関口等はコンピューターシミュレーションや縮尺模型から得られたインパルス応答を用い、オーケストラ演奏を対象とした場合のステージ形態に関する検討を行っており、演奏者相互間では反射音を拡散処理したステージ形態の評価が高くなることを明らかにしている¹¹⁾。

橘、上野等は実在のホールから得られたインパルス応答を実時間で畳み込む3次元シミュレーション音場を用い、演奏者に対して初期反射音及び後期反射音の与える影響に関する実験を行っており¹²⁾¹³⁾、ソロ演奏において強度と遅れ時間が適切な場合には、後期反射音が演奏の手助けとなることを明らかにしている。また橘、上野等はアンサンブルやオーケストラ演奏における望ましい音響特性に対する主観評価実験を行っており、残響音エネルギーの変化が室内楽演奏のしやすさに対して大きな影響があることを指摘している¹⁴⁾¹⁵⁾。

これら既往の研究からは、ステージ上の音響条件が演奏者の主観評価に与える影響等に関する知見が明らかにされてきているものの、それらの多くはソロや小編成アンサンブルに関するものである。多種多数の楽器集合体を指揮者が率いるオーケストラに対してはモデル化や実験手法が困難であるため敬遠されがちであり、特に実験的なアプローチによる研究例は少ない。一般的なホールでの演目の多くがオーケストラ演奏であるにもかかわらず、オーケストラ演奏のステージ音響条件に関する知見の蓄積は極めて少ないと言える。

一方筆者等は、オーケストラに対するステージ音響条件の取り扱いの解決に取り組んできており、オーケストラ指揮者の存在に着目している。個々のオーケストラ演奏者に対して最適な音響条件を提供することは不可能であるが、オーケストラの統括・制御を行う指揮者に対して最適な音響条件を提供することにより、オーケストラ演奏全体の質を確保することは可能であると考えている。

これに関わらず、オーケストラ演奏で重要な役割を演ずる指揮者に対するステージ音響条件の影響は明らかにされるべきであるが、これまでに指揮者を対象とした先行研究としてはMeyerが計算による考察から指揮者位置における音響構造の構成メカニズムに関して言及しているに過ぎず¹⁶⁾、現在に至るまで指揮者の主観を対象とした実験的手法を用いた研究は未着手であると言え、定量的な知見はほとんど得られていない。本研究は、指揮者の演奏環境に関する基礎的情報を提供する初歩的段階の実験的研究であり、また今後の展開においては、オーケストラの演奏環境に対する解法に発展する可能性を含む内容と位置づけられる。

1.3 本論文の目的と概要

本研究の目的は実験的手法を用いてステージ上の音響条件が指揮者の主観評価に対して与える影響を明らかにすることである。本報では、このための初歩的段階として、従来聴衆やソロ・小編成演奏に対して行われてきた実験手法を準用し、無響室に構築されたモデル音場において指揮者の主観評価に対する各音響パラメータの影響を明らかにし、演奏者との比較においてその特徴を明らかにしよう

としており、4つの実験シリーズ（実験1～4）による結果の報告が行われている。実験1～3においては音響条件の指揮者の主観評価に与える直接的影響が測定され、実験4においては指揮者と演奏者の相互の影響を考慮に入れた状態での音響条件に対する指揮者の主観評価が測定されている。なお本報は筆者等による発表¹⁷⁾¹⁸⁾の内容を取りまとめ、さらに追加として行われた実験の結果を含んだ内容となっている。

2. 残響音の影響に関する実験（実験1）

2.1. 実験概要

指揮者の主観評価に対する残響音の影響を明らかにすることを目的として、実験1を行った。無響室内に構築されたモデル音場において、指揮者である被験者は提示された音響条件下で2名の演奏者（フルート）に対して指揮を行い、提示された音響条件に対して主観評価を行う。

図1に実験装置の概要を示す。椅座位の被験者からスピーカーまでの距離は1.5m、スピーカーの高さは床面から1.1m、被験者から演奏者までの距離は3mである。各音場は、楽器からの直接音と、それをマイクで集音しリバーブレータを通してスピーカーから出力される残響音によって構成される。残響音は5つのスピーカーから均等な出力で提示される。なお本実験および以降の実験2,3においては、演奏者の間接的影響が指揮者の主観評価に混在することを防ぐために、演奏者に対する音響条件は無響状態の一定とした。無響状態において演奏者は多少の違和感を生じるものの、演奏に関して支障の出る状況ではないことを確認している。

図1 実験装置概要（実験1）

実験1における音響構造モデルを図2に、提示した音響条件の構成を表1に示す。この音響構造モデルは、直接音およびブステージエンクロージャー内における残響音によって構成されており、残響音には客席部からの返り音は含まれないと想定されている。

表1 音響条件の構成（実験1）

パラメータ	設定値
RT_{ER} [s]	0.5, 1.0, 1.5, 2.0
Δt_{ER} [ms]	30

図2 音響構造モデル（実験1）

表1中の各設定値は演奏者位置においてインパルスが発生させることによって得られた被験者聴取位置における音響条件を分析した値である。提示音場は4種類あり、残響時間 (RT_{ER}) のみバリエーションがつけられている。聴取レベルは直接音と反射音を合わせて80dB (Leqによる測定値) となるように設定し、その結果直接音に対する残響音エネルギーの相対レベルは+9dBとなった。

各試行において、ランダムな順で提示される各音場において被験者は演奏者に対して指揮を行い、演奏者はその指揮に合わせて楽曲を演奏する。被験者は演奏終了時点で提示音場に対する「指揮のしやすさ」などいくつかの主観量について7段階のカテゴリー尺度(例えば、-3: 指揮しにくい～+3: 指揮しやすい)を用いた評価および内観報告を行う。なお、指揮者の主観評価に対する演奏者の応答の差異による影響を防ぐために、試行間において演奏のテンポや表現が大きく変化することがないように、被験者である指揮者に対して教示を行った。また演奏者には、試行間において演奏の出力レベルが極端に異ならないように教示がなされた。以降の実験(実験2～4)においても同様の教示がなされている。

被験者は三重大学管弦楽団および吹奏楽団に所属する2～6年の経験をもつ指揮者6名である。演奏者はすべての試行において同一奏者であり、同所属のフルート奏者2名(共に経験年数7年)であった。また実験に用いた楽曲は、曲調の違いによる影響を考慮するために、ケーラー作曲「ソナチネ op.96」およびモーツァルト作曲「アレグロ K.V.3」の2曲とした。以後、これらの楽曲を楽曲1、2とする。楽曲1はテンポの遅い落ち着いた曲調、楽曲2はテンポが速く軽快な曲調である。楽曲の曲調を表す指標である自己相関関数の有効継続時間 τ ¹⁹⁾の0.1秒毎の平均値は楽曲1において148ms、楽曲2において82msであった。

2.2 実験結果および考察

実験に参加した被験者は6名であり、うち5名は2回の試行に、1名は1回の試行にのみ参加している。被験者のうち1名は同一条件に対する2回の試行間での評価の差が大きかったため、分析対象から除外した。

楽曲1および2においてそれぞれ得られた「指揮のしやすさ」の評価に対して RT_{ER} を要因として分散分析を行った結果を表2、表3に示す。

表2 分散分析の結果(楽曲1)

要因	自由度	偏差平方和	不偏分散	分散比	P値	判定
全体	19	25.438				
RT_{ER}	3	3.938	1.313	0.977	0.428	[ ]
誤差	16	21.500	1.344			

有意差判定: P ($P \leq 0.01$ [**), $P \leq 0.05$ [*], $P > 0.05$ [ ])

表3 分散分析の結果(楽曲2)

要因	自由度	偏差平方和	不偏分散	分散比	P値	判定
全体	19	23.550				
RT_{ER}	3	10.450	3.483	4.254	0.022	[*]
誤差	16	13.100	0.819			

表2では、楽曲1においては RT_{ER} の有意な影響が見られなかったが、表3は楽曲2において RT_{ER} が有意に「指揮のしやすさ」に対して影響を与える結果を示している。図3、図4に楽曲1および楽曲2の実験結果を示す。図中の黒丸は評価値の平均値を、ひげの上端および下端は標準偏差の範囲を表す。また中山等は τ と演奏

者に対する最適残響時間の関係を図式化しており⁶⁾、図中に文献[6]から導出されたほぼ同条件におけるアルトリコーダー奏者のプリファレンスに対する最適残響時間を併記する。

図3 指揮のしやすさに対する RT_{ER} の影響(楽曲1)

図4 指揮のしやすさに対する RT_{ER} の影響(楽曲2)

楽曲1において各条件に対する評価値の平均値は $RT_{ER}=1.5$ sにおいて最大となるが、各 RT_{ER} に対する評価値の平均値の間には統計的な有意差は見られなかった。一方、楽曲2においては $RT_{ER}=1.0$ sに対する評価値の平均値が、0.5sおよび2.0sのそれと比べて有意に高かった。楽曲2において0.5sの条件に対して「明瞭性は良いが、響きが少なすぎて物足りない」というコメントも得られた。一方2.0sの条件においては「響きが多すぎて明瞭性に欠ける」とのコメントが得られており、共にやや低い評価となっている。被験者のコメントからは響きの量に関する内容が多く見られたが、実験条件に対する不自然さに関する報告は見られなかった。また、実験1の結果において「指揮のしやすさ」と最も高い相関を得た回答項目は「響きの量」であり、その値は0.561であった。被験者の内観報告と主観評価には対応が得られている。

また各音場に対する評価値のばらつきは楽曲2よりも楽曲1のほうがやや大きい。楽曲1はロングトーンが多く、発音数が少ない曲調であったために RT_{ER} に対する判断が困難であったことに起因していると考えられる。

正確な比較を行うことはできないが、文献[6]に基づいて導出された本実験と同様の条件下における演奏者に対する最適残響時間は楽曲1において1.2s、楽曲2において0.5sであった。また安藤は聴衆に対する τ と最適残響時間の関係を提案しており¹⁹⁾、これによると本実験で用いた楽曲の聴衆に対する最適残響時間は楽曲1において3.4s、楽曲2において1.9sとなる。

本実験では演奏者に対しては無響状態であるため、結果を単純に

比較することはできないが、本実験で得られた指揮者による評価値が最大となる残響時間と、演奏者および聴衆それぞれにおける最適値には違いが見うけられた。

3. 後期反射音の影響に関する実験（実験2）

3.1 実験概要

実験2では後期反射音の影響を明らかにすることを目的とし、直接音に対する後期反射音の遅れ時間（以降 Δt_{LPE} と表記する）およびレベル差（以降 ΔL_{LPE} と表記する）をパラメータとして、実験1と同様にモデル音場における指揮者に対する主観評価実験を行った。本実験における後期反射音は客席部後壁からのねえ返り音を想定している。なおこの実験においては、後期反射音に対する指揮者の評価が主としてネガティブであると予想し、被験者には「指揮のしやすさ」ではなく「指揮のしにくさ」という主観評価量に対して7段階のカテゴリー尺度（0：全く感じない～6：非常に指揮がしにくい）で回答を行わせた。また、演奏の試行は、被験者の判断の検出力を高めるため、図5に示すようなよりモデル的な演奏形態で行われた。被験者は電子ドラム奏者に対して指揮を行い、その際に提示されている指揮者位置の音場の主観評価を行う。図5に装置概要を、図6に音響構造モデルを、表4に提示した音響条件の構成を示す。表4中の各設定値はディレイ装置等のエフェクト回路にインパルス信号を流し、その際の被験者聴取位置で得られた音響条件を分析した値である。なお直接音の聴取レベルは80dB（騒音計のfast特性で測定した音圧のピーク値）に設定した。また、演奏者が電子ドラムを演奏する際に生じる打撃音は、スピーカから再生される直接音によってマスクされるため、被験者に対して影響を与えていない。

図5 実験装置概要（実験2）

図6 音響構造モデル（実験2）

表4 音響条件の構成（実験2）

パラメータ	設定値
Δt_{LPE} [ms]	100, 150, 200, 250
ΔL_{LPE} [dB]	-3, -9, -15, -21, -27

り、すべての試行において同一奏者である。また楽曲としては図7に示す2種類のリズムパターンを用いた。各リズムパターンにおける τ の0.1秒毎の平均値は28msおよび34msとほぼ同値であり、両パターンにおける実験結果の間に差異は見られなかったため、各リズムにおいて1回ずつ試行された実験結果の平均値を各音響条件における主観評価量の代表値としている。

図7 リズムパターン

3.2 実験結果および考察

図8に各提示音場に対する「指揮のしにくさ」の評価値を示す。 Δt_{LPE} が小さくなるほどに、また ΔL_{LPE} が大きくなるほどに（後期反射音レベルが小さくなるほどに）、「指揮のしにくさ」は減少する傾向が見られる。表5に Δt_{LPE} および ΔL_{LPE} を要因として分散分析を行った結果を示す。

図8 指揮のしにくさに対する Δt_{LPE} および ΔL_{LPE} の影響

表5 Δt_{LPE} および ΔL_{LPE} を要因とした分散分析の結果（実験2）

要因	自由度	偏差平方和	不偏分散	分散比	P値	判定
全体	231	858.276				
Δt_{LPE}	3	173.000	57.667	45.459	1.00E-22	【**】
ΔL_{LPE}	4	379.901	94.975	74.869	1.80E-39	【**】
$\Delta t_{LPE} \times \Delta L_{LPE}$	12	36.442	3.037	2.394	0.006	【**】
誤差	212	268.933	1.269			

表5では Δt_{LPE} 、 ΔL_{LPE} および Δt_{LPE} と ΔL_{LPE} の交互作用が「指揮のしにくさ」に対して有意な影響を与えていることが示されている。「指揮のしにくさ」を目的変数、 Δt_{LPE} と ΔL_{LPE} を説明変数として重回帰分析を行った結果を表6に示す。

表6 重回帰分析の結果（実験2）

説明変数名	標準偏回帰係数	P値	判定
Δt_{LPE}	0.437	1.37E-22	【**】
ΔL_{LPE}	0.665	3.86E-41	【**】
定数項	2.694		

決定係数 $R^2=0.633$

表6において、 Δt_{LPE} および ΔL_{LPE} に対する標準偏回帰係数を比較すると、値の大きい ΔL_{LPE} が「指揮のしにくさ」に対してやや強い影響力を持っていると言える。

また、被験者は各試行において後期反射音の知覚の有無に関しても回答を行っている。図9に各音場に対して後期反射音を知覚した

実験に参加した被験者は三重大学吹奏楽団に所属する6名の指揮経験者である。演奏者は同所属の打楽器奏者（経験年数8年）であ

被験者数の割合を、表 7 に後期反射音の知覚を要因として「指揮のしにくさ」に対して分散分析を行った結果を、図 10 に後期反射音の知覚の有無と「指揮のしにくさ」の関係を示す。

図 9 では、 $\Delta t_{LPE}=100\text{ms}$ 、 $\Delta L_{LPE}=-27\text{dB}$ の条件において、ほとんどの被験者が後期反射音を知覚していない。また条件 100ms 、 -21dB および 150ms 、 -27dB においては、およそ半数の被験者が後期反射音を知覚したと回答しているが、その他の条件においては被験者のほとんどすべてが後期反射音を知覚している。

図 9 後期反射音を知覚した被験者数の割合

表 7 後期反射音の知覚を要因とした分散分析の結果 (実験 2)

要因	自由度	偏差平方和	不偏分散	分散比	P 値	判定
全体	243	952.307				
LPE の知覚	1	251.838	251.838	87.006	7.14E-18	【**】
誤差	242	700.469	2.895			

図 10 指揮のしにくさに対する後期反射音の知覚の影響

表 7 では、被験者の後期反射音に対する知覚の有無が「指揮のしにくさ」に対して有意な影響を与えていることが示されている。図 10 からは、被験者の後期反射音に対する知覚の有無によって、両条件群の評価値の平均値および分布に大きな差が生じていることが分かる。両条件群の「指揮のしにくさ」の平均値には有意な差が見られ、全体的には後期反射音が知覚されない条件において「指揮のしにくさ」を感じない傾向にあることが分かる。しかし知覚された条件において「指揮のしにくさ」の評価値は大きく分布しており、知覚された条件すべてが必ずしも指揮しにくい条件と判断されるわけではないことを示唆している。「指揮のしにくさ」と後期反射音を知覚した割合との相関係数は 0.708 であり、図 8 と図 9 の比較からは条件 100ms 、 -15dB や 200ms 、 -27dB のように後期反射音が知覚されていても、評価が低くならない場合があることがわかる。

被験者は各試行において音場に対する「好ましきさ」についても 7 段階のカテゴリー尺度 (+3: 非常に好ましい ~ -3: 非常に好ましくない) で回答を行っている。図 11 に各条件に対する「好ましきさ」の評価値を示す。

図 11 好ましきさに対する Δt_{LPE} および ΔL_{LPE} の影響

「好ましきさ」が 0 以下の評価を得た音響条件は、被験者に対してネガティブな影響を与える条件範囲であると考えられる。図 11 において「好ましきさ」の評価値の正と負の境界線は、図 8 における「指揮のしにくさ」の評価値が 2 以上となる境界線とほぼ一致している。「指揮のしにくさ」と「好ましきさ」の間には -0.843 の相関があり、本実験において好ましくないと判断された条件は「指揮のしにくさ」の尺度としては 2 以上の範囲であることが示唆される。逆に「好ましきさ」が 1 以上の評価を得た条件では、被験者は積極的にその音場を受け入れたと考えることができ、被験者は後期反射音を知覚しない条件であったために「好ましきさ」を感じた場合 (条件 100ms 、 -27dB および 150ms 、 -27dB) と、後期反射音が適切な条件で知覚されたために「好ましきさ」を感じた場合 (条件 100ms 、 -15dB) があると思われる。なお、中村等による声楽家に対する好ましいエコー条件⁸⁾によれば、条件 100ms 、 -15dB は声楽家に対して好ましい条件であるとされており、この条件に関しては結果の合致が見られた。しかし声楽家の評価は後期反射音が知覚されにくい条件に対して低下する傾向にあることに対して、本実験で得られた結果は逆の傾向であり、この点において両者の評価構造の差異が窺える。この差異の原因は自ら音を発する主体であるか否かによるものと思われる。なお、本実験において被験者は「指揮のしにくさ」「好ましきさ」以外のいくつかの主観尺度に対しても 7 段階のカテゴリー尺度において評価を行っており、「指揮のしにくさ」と最も高い相関が得られた尺度は「リズムのとりにくさ」であり、その値は 0.925 であった。

本実験における後期反射音が被験者に与える影響は、下記のようにまとめられる。

- ・全体的な傾向として、後期反射音が被験者に知覚される条件では、被験者の音場に対する評価は低くなり、逆に知覚されない条件では評価は高くなる傾向にある。
- ・後期反射音が知覚されても積極的に受け入れられる条件も見うけられ、特異な条件が存在する可能性もうかがえる。

4. 残響音と後期反射音の複合的影響に関する実験 (実験 3)

4.1 実験概要

実験 1 および 2 において単独に取り扱った残響音および後期反射音の音響条件の組み合わせが指揮行為に対して与える影響について明らかにすることを目的として実験 3 を行った。図 12 に実験装置概要を、表 8 に音響条件の構成を示す。表 8 中の各設定値はディレイ装置等のエフェクト回路にインパルス信号を流し、その際の被験者聴取位置で得られた音響条件を分析した値である。

実験に用いる提示音場のモデルは中村等が提案した実験音場モデルを参考に²⁰⁾、図13に示すような構成とした。音響構造モデルに含まれるホール残響音の残響時間は2.0s、直接音に対する遅れ時間は80ms、レベルは60dB (fast特性のピーク値)に固定した。被験者に提示される音場は後期反射音が付加されない8条件と後期反射音が付加される48条件の計56条件である。演奏時の直接音と残響音の合計聴取レベルは80dB (Leqによる測定値)となるように設定した。各提示音場に対して被験者は「指揮のしにくさ」の評価について7段階のカテゴリー尺度(0:全く感じない~6:非常に指揮がしにくい)で回答を行った。

実験3における被験者は実験2に参加した6名の被験者であり、演奏者も同一奏者である。また、実験3において用いた楽曲(リズムパターン)は実験2と同じである。

図12 実験装置概要 (実験3)

表8 音響条件の構成 (実験3)

パラメータ	設定値
RT_{ER} [s]	1.0, 1.5
Δt_{ER} [ms]	20, 40
ΔL_{ER} [dB]	-3, -9
Δt_{LPE} [ms]	150, 200, 250
ΔL_{LPE} [dB]	-15, -21

図13 音響構造モデル (実験3)

4.2 実験結果および考察

後期反射音の有無を要因として「指揮のしにくさ」の評価値に対して分散分析を行った結果を表9に、後期反射音を含む条件群において各音響パラメータを要因として分散分析を行った結果を表10に示す。なお、表10において3次以上の交互作用の計上は省略した。

表9 後期反射音の有無を要因とした分散分析の結果 (実験3)

要因	自由度	偏差平方和	不偏分散	分散比	P値	判定
全体	671	1191.905				
LPEの有無	1	107.056	107.056	66.117	2.06E-15	[**]
誤差	670	1084.849	1.619			

表9は、後期反射音の有無が「指揮のしにくさ」に対して有意な影響を与えている結果を示している。「指揮のしにくさ」の評価値の平均値差を検定したところ、後期反射音が「有り」の条件群が「無し」の条件群に比べて有意に高く、実験2の結果と整合している。

表10では Δt_{ER} 、 ΔL_{ER} 、 Δt_{LPE} 、 ΔL_{LPE} が「指揮のしにくさ」に対して有意な変動要因として挙がっており、さらに Δt_{ER} と ΔL_{ER} 、 Δt_{LPE} と ΔL_{LPE} の交互作用も挙がっている。しかし $\Delta t_{ER}=20\text{ms}$ の条件群と $\Delta t_{ER}=40\text{ms}$ の条件群には有意な平均値差は見られない。

表10 各音響パラメータを要因とした分散分析の結果 (実験3)

要因	自由度	偏差平方和	不偏分散	分散比	P値	判定
全体	575	988.859				
RT_{ER}	1	0.043	0.043	0.036	0.849	[ ]
Δt_{ER}	1	6.460	6.460	5.406	0.020	[*]
ΔL_{ER}	1	9.252	9.252	7.743	0.006	[**]
Δt_{LPE}	2	104.948	52.474	43.914	2.28E-18	[**]
ΔL_{LPE}	1	163.627	163.627	136.936	2.77E-28	[**]
$RT_{ER} \times \Delta t_{ER}$	1	0.391	0.391	0.327	0.568	[ ]
$RT_{ER} \times \Delta L_{ER}$	1	2.641	2.641	2.210	0.138	[ ]
$RT_{ER} \times \Delta t_{LPE}$	2	1.920	0.960	0.803	0.448	[ ]
$RT_{ER} \times \Delta L_{LPE}$	1	2.641	2.641	2.210	0.138	[ ]
$\Delta t_{ER} \times \Delta L_{ER}$	1	15.668	15.668	13.113	3.21E-4	[**]
$\Delta t_{ER} \times \Delta t_{LPE}$	2	0.733	0.366	0.307	0.736	[ ]
$\Delta t_{ER} \times \Delta L_{LPE}$	1	0.002	0.002	0.001	0.970	[ ]
$\Delta L_{ER} \times \Delta t_{LPE}$	2	1.920	0.960	0.803	0.448	[ ]
$\Delta L_{ER} \times \Delta L_{LPE}$	1	0.085	0.085	0.071	0.790	[ ]
$\Delta t_{LPE} \times \Delta L_{LPE}$	2	11.399	5.700	4.770	0.009	[**]
誤差	528	630.917	1.195			

図14 各条件群における指揮のしにくさ

図14は後期反射音の影響について実験2と実験3を比較したものであり、各条件における評価の平均値を示す。両実験において、 $\Delta L_{LPE}=-15\text{dB}$ の条件群に対しておおむね $\Delta L_{LPE}=-21\text{dB}$ の条件群の「指揮のしにくさ」が低い結果となった。 $\Delta L_{LPE}=-15\text{dB}$ の条件群において実験間の評価の平均値には有意差は見られないが、 $\Delta L_{LPE}=-21\text{dB}$ の条件群においては実験2に比べて実験3の評価の平均値が有意に低い。直接音と後期反射音のみから構成される実験2の条件群においては、後期反射音が小さいレベルであっても知覚されやすい一方で、実験3の条件群には残響音に後期反射音が加えられているため、後期反射音のレベルが小さい場合には被験者に検知されない可能性がある。なお、実験3において後期反射音が付加されない条件群の評価の平均値は、 $\Delta L_{LPE}=-15\text{dB}$ および $\Delta L_{LPE}=-21\text{dB}$ の条件群に比べ、有意に低い。また、いずれの実験においても Δt_{LPE} が大きくなるにつれて「指揮のしにくさ」は増加している。

表 11 に「指揮のしにくさ」を目的変数とし、実験 3 における各パラメータを説明変数として重回帰分析を行った結果を示す。得られた重回帰式の決定係数の値が小さいため、十分に結果を説明できているとは言えないが、「指揮のしにくさ」に対して最も影響の大きいパラメータは ΔL_{LPE} であり、次いで Δt_{LPE} の影響が大きい結果となった。 RT_{ER} の影響は見られず、 Δt_{ER} および ΔL_{ER} が「指揮のしにくさ」に対して与える影響はわずかである。

表 11 重回帰分析の結果 (実験 3)

説明変数名	標準偏回帰係数	P 値	判定
RT_{ER}	-0.007	0.852	[ ]
Δt_{ER}	0.081	0.023	[*]
ΔL_{ER}	0.097	0.006	[**]
Δt_{LPE}	0.325	8.21E-19	[**]
ΔL_{LPE}	0.407	1.15E-27	[**]
定数項	3.745		

決定係数 $R^2=0.287$

実験 1 の結果では、楽曲 2 において RT_{ER} の「指揮のしやすさ」に対する有意な影響が見られたが、実験 3 では楽曲 2 に比べて短い t_e を持つリズムパターンにおいて、 RT_{ER} は「指揮のしにくさ」に対して有意な影響を与えない結果となった。また実験 2 と実験 3 では、ともに ΔL_{LPE} の影響が「指揮のしにくさ」に対して支配的であった。残響時間が指揮行為に対して適切であり、指揮者が「指揮しやすい」と感じる音響条件であっても、後期反射音が加わることによって評価に大きな影響を及ぼすと思われる。なお、実験 2 と同様にこの実験においても「指揮のしにくさ」と最も相関の高い尺度は「リズムのとりにくさ」であり、相関係数の値は 0.760 であった。また文献 [13] で報告されている演奏者の「ホールの応答を得る」という主観に相当するものとして、本実験では「手ごたえの程度」に対しても被験者は回答を行っているが、「指揮のしにくさ」と「手ごたえの程度」の間の相関係数は 0.063 であった。

5. 指揮者と演奏者の評価構造の比較に関する実験 (実験 4)

5.1 実験概要

指揮者および演奏者のステージ音場に対する評価構造の差異を明らかにすることを目的として、同一のステージ音響条件における二者の主観評価に対する比較実験を行った。

モデル音場において、指揮者はキーボード演奏者およびウィンドシンセサイザー演奏者に対して指揮を行い、楽曲を演奏する。演奏終了後、指揮者は「指揮のしやすさ」に対して、演奏者 2 名はそれぞれが「演奏のしやすさ」に対して 7 段階のカテゴリー尺度 (-3: 指揮しにくい ~ +3: 指揮しやすい, -3: 演奏しにくい ~ +3: 演奏しやすい) で回答を行う。指揮者および演奏者にはエフェクト回路を通してステージ上の音響状態を想定したモデル的音場刺激がヘッドホン再生により提示される。エフェクト回路はパソコンとマルチチャンネルオーディオアダプタおよびコンボリミューションリバーブ等のソフトウェアから成り、本実験では演奏者によって奏でられた無響状態の楽音信号に対して実時間量込み演算が行われ、エフェクトの付加および各被験者に対する音場定位がなされる。ここではステージ上における反射音が一般的な拡散音場であるとの仮定を設け、指揮者および演奏者に対して等しい残響音および後期反射音が提示された。指揮者に対する直接音の音場は各演奏者の方向に定位されており、残響音および後期反射音はモノラル再生である。また、

演奏者に対しては自分の発した直接音および残響音はモノラル再生として、共演奏者の直接音のみ側方の音場定位で再生される。図 15 に実験装置概要を、図 16 に再生音場の音響構造モデルを、表 12 には提示した音響条件の構成を示す。表 12 中における設定値は回路にインパルス信号を流し、その際の各被験者に聴取される音響条件を分析した値である。被験者に対する提示レベルは後期反射音が付加されない状態で 80dB (L_{eq} による測定値)、直接音に対する残響音エネルギーの相対レベルは +1dB として設定がなされた。

被験者は三重大学管弦楽団および吹奏楽団に所属する 2 ~ 6 年の指揮経験をもつ指揮者 6 名である。またキーボード演奏者、ウィンドシンセサイザー演奏者の楽器経験年数はそれぞれ 19 年および 21 年である。また用いた楽曲はラヴェル作曲「亡き王女のためのパヴァーヌ」の、冒頭の 19 小節である。なお、この楽曲の t_e の 0.1 秒毎の平均値は 247ms であった。

図 15 実験装置概要 (実験 4)

図 16 音響構造モデル (実験 4)

表 12 音響条件の構成 (実験 4)

パラメータ	設定値
RT_{ER} [s]	0.7, 1.2, 1.7
後期反射音	有, 無

5.2 実験結果および考察

実験 4 において各被験者の全条件に対する評価の平均値には、演奏者相互間には有意差が見られなかった一方で、指揮者と各演奏者の間にはそれぞれ有意差が見られた。実験結果を重回帰分析によって処理した結果を表 13 ~ 15 に示す。

表 13 重回帰分析の結果 (指揮者)

説明変数名	標準偏回帰係数	P 値	判定
RT_{ER}	0.166	0.228	[ ]
LPE の有無	-0.614	7.16E-5	[**]
定数項	-0.142		

決定係数 $R^2=0.397$

表 14 重回帰分析の結果 (キーボード演奏者)

説明変数名	標準偏回帰係数	P 値	判定
RT_{ER}	0.437	2.81E-4	[**]
LPE の有無	-0.669	5.05E-7	[**]
定数項	-2.226		

決定係数 $R^2=0.619$

表 15 重回帰分析の結果（ウィンダシンセサイザー演奏者）

説明変数名	標準偏回帰係数	P値	判定
RT _{ER}	0.223	0.009	【**】
LPEの有無	-0.865	2.85E-12	【**】
定数項	-0.353		

決定係数 $R^2=0.785$

表 13 において「指揮のしやすさ」に対して RT_{ER} の有意な影響は見られず、「後期反射音の有無」のみが「指揮のしやすさ」に対して有意な影響を与えている。このことは実験 3 の結果と符合する。一方、表 14、表 15 において「演奏のしやすさ」は RT_{ER} および「後期反射音の有無」の両要因によって影響を受けており、指揮者と演奏者の評価構造の差異が、主観評価量に対して影響を与える要因の差異となって現れていると考えられる。なお、被験者は「指揮のしやすさ」の他に、「演奏者の反応」「コントロール感」等に対しても主観評価を行っている。「指揮のしやすさ」とそれぞれの評価尺度の間には 0.601 および 0.582 の相関係数が得られ、指揮者と演奏者間に生じるコミュニケーションも間接的に「指揮のしやすさ」と関連している可能性がある。

6. まとめ

指揮者に対する音響条件の直接的影響を取り扱った 3 種の実験と、同一ステージ音響条件下における主観評価に対する演奏者との比較実験を行った。これらの結果から得られた知見を以下に示す。

- ・直接音と残響音で構成されるステージ音響条件に対する指揮者の「指揮のしやすさ」の評価は残響時間によって影響を受け、最適値が存在すると思われる。また、既往の研究による同様の条件下における演奏者および聴衆のプリファレンスが最大となる残響時間との違いを示した。
- ・直接音と後期反射音で構成されるステージ音響条件に対する指揮者の「指揮のしにくさ」の評価は、後期反射音のレベル・遅れ時間に影響を受け、後期反射音が知覚されるか否かにより大凡の評価が決まる。しかし、検知範囲内でも特異な場合が存在し、既往の研究において声楽家にみられるような後期反射音を積極的に受け入れる音響条件も存在すると思われる。
- ・残響音と後期反射音が混在するステージ音響条件に対する指揮者の「指揮のしにくさ」の評価は、主として後期反射音に影響を受け、残響音の影響は小さくなる。ステージ上の残響音が適切な状態であっても、後期反射音の存在によって評価が大きく低下する可能性が示唆される。
- ・一つのオーケストラを構成する指揮者と演奏者の、演奏時におけるステージ音響条件に対する主観評価は異なる可能性があり、指揮者は主として後期反射音のみに影響を受けるのに対し、演奏者は後期反射音および残響音の両者に影響を受ける。また、演奏者の音響条件に対する応答も、指揮者の主観評価に影響がある可能性がうかがえる。

本研究においては指揮者のステージ音場に対する特徴など基礎的な情報が明らかにされ、また声楽家を含む演奏者との特徴の違いも明らかになった。ただし本報において示した実験結果は、演奏者を無響状態で演奏させるなど実験的な仮定を用いたモデル的音場による初歩的研究段階の成果である。ステージ音響設計などに資するデー

タを得るには、現実のステージ音場やオーケストラ演奏状態を想定した実験設定が必要であり、今後は実験における音響構造モデルとオーケストラ演奏モデル（演奏者と指揮者の相互関係の再現など）の検討が課題である。さらに定量的な知見を蓄積するためには、実験における提示条件や主観評価尺度のバリエーションを拡げる必要がある。またこれらから得られる演奏者・指揮者の主観評価の結果を分析することにより、両者の評価構造の詳細や差異、相互の依存関係などが明らかにされ、「指揮者に着目したオーケストラのための音響設計」の可能性を検討する段階へと発展するものと期待する。

参考文献

- 1) Harkness, E. L.: A Note on the Design of the Stage End of Concert Halls from Aspects of Instrument Onset Characteristics and Rise Time of Reverberation of the Hall, *ACUSTICA*, Vol.31, No.3, pp.125-131, 1974
- 2) Harkness, E. L.: Performer Tuning of Stage Acoustics, *Applied Acoustics*, Vol.17, No.2, pp.85-97, 1984
- 3) Marshall, A.H., Meyer, J.: The Directivity and Auditory Impressions of Singers, *ACUSTICA*, Vol.58, pp.130-140, 1985
- 4) Gade, A.C.: Musicians' Ideas about Room Acoustical Qualities, Report No.31, The Acoustic Lab. Tech. Univ. Denmark, 1981
- 5) Gade, A.C.: Subjective Room Acoustic Experiments with Musicians, Report No.32, The Acoustic Lab. Tech. Univ. Denmark, 1982
- 6) 中山一郎, 上島力: 演奏者にとって好ましい反射音の条件について, 日本音響学会, 建築音響研究会資料, AA88-25, 1988
- 7) 中山一郎, 藤山尚, 日高孝之: 長い遅れ時間を持つ初期反射音が歌唱に及ぼす影響について, 日本音響学会, 建築音響研究会資料, AA95-008, 1995
- 8) 中村俊一, 白砂昭一: コンサートの舞台において演奏者に好まれるエコーの条件 - 声楽の場合 -, 日本音響学会, 建築音響研究会資料, AA84-28, 1984
- 9) 橋本修, 木村翔, 廣瀬大輔: 仮想音源分布を用いて方向別応答を変化させた舞台音場におけるソロ演奏者の主観評価に対する研究, 日本建築学会計画系論文集, 第 521 号, pp.9-15, 1999.7
- 10) 加藤丈晴, 木村翔, 橋本修, 廣瀬大輔, 古田俊也: 複数演奏者の相互アンサンブルを想定した主観評価実験による「演奏のしやすさ」と変調度の保存性についての基礎的研究, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.195-196, 1996
- 11) 中川清, 関口克明: ステージ形態のオーケストラ演奏に対する音響効果, 日本建築学会技術報告集第 4 号, pp.58-63, 1997.3
- 12) 上野佳奈子, 佐藤史明, 橋秀樹, 小野隆彦, 千住真理子: 演奏者に対する初期反射音の効果に関する基礎実験, 日本音響学会講演論文集, pp.837-838, 1998.9
- 13) 上野佳奈子, 佐藤史明, 橋秀樹, 小野隆彦: 演奏者に対する後期反射音の効果, 日本音響学会, 建築音響研究会資料, AA99-12, 1999
- 14) 六反田素子, 金森敬子, 上野佳奈子, 橋秀樹: アンサンブル演奏のしやすさに関するシミュレーション実験 - その 2: 室内楽演奏を想定したプロ演奏家による評価 -, 日本音響学会講演論文集, pp.1009-1010, 2003.3
- 15) 金森敬子, 上野佳奈子, 橋秀樹: アンサンブル演奏のしやすさに関するシミュレーション実験 - その 3: オーケストラを想定したプロ演奏家による評価 -, 日本音響学会講演論文集, pp.853-854, 2004.3
- 16) J. Meyer, Influence of Communication on Stage on the Musical Quality, 15th. International Congress on Acoustics, pp.573-576, 1995
- 17) 藤本隆史, 徳永泰伸, 寺島貴根: 指揮者と演奏者の相互的影響を考慮した音場評価実験 その 1, 日本建築学会学術講演梗概集 D-1, pp.79-80, 2004
- 18) 徳永泰伸, 寺島貴根: ステージおよび客席部からの反射音群が「指揮のしにくさ」に与える影響, 日本建築学会学術講演梗概集 D-1, pp.159-160, 2005
- 19) 安藤四一: 建築音響学, シュプリンガー・フェアラーク東京, 2000.6
- 20) 中村俊一, 白砂昭一, 坪井政義: エンクロージャによる多重反射の効果について - 独唱者のためのステージ音響設計 -, 日本音響学会, 建築音響研究会資料, AA87-48, 1987

(2007年2月10日原稿受理, 2007年9月13日採用決定)