ステージ形態のオーケストラ演奏に対する音響効果

EVALUATION OF SOUND FIELDS IN TYPICAL STAGE ENCLOSURES FOR ORCHESTRA PERFORMANCE

中川 清 ——*1
関口克明 ——*2

Kiyoshi NAKAGAWA
Katsuaki SEKIGUCHI

This paper presents objective and subjective evaluations of eight types of side stage enclosures for orchestra performances. Three different methods are applied in this study; the ray tracing computer simulation, the acoustical scale model experiment, and the auditory experiment by paired comparison. Results are as follows: The acoustic characteristics of stage enclosure shapes can be determined by comparing remained and radiated energy within 80 msec. Preferred stage shapes vary in terms of the playing, conducting, and listening positions.

キーワード：
ステージ形態、オーケストラ演奏、音線法、一対比較法、物理特性、主観効果

Keywords：
Stage enclosure shape, Orchestra performance, The ray tracing method, The method of pare comparisons, Objective evaluation, Subjective evaluation

1. はじめに

コンサートホール（以下ホールと記す）の音響設計においては、聴衆と演奏者の立場からのそれぞれ異なる音響条件を満足させる必要がある。これまではホール音響の研究は主に客席空間を対象としており、初期エネルギー量や反射音の到来方向に着目した各種の評価指標が提案され、音響設計に利用されてきた。¹⁾ 一方、演奏者に対する音響研究は比較的新しく、楽器演奏に対する主な研究実績として、Marshall²⁾ は弦楽三重奏による「合奏のし易さ」の条件として、他の演奏者の反射音の遅れ時間が17～35 msecに相当する反射面、及びその必要周波数として500～2kHzを提案している。また、Gade³⁾ は演奏者の意向調査から、演奏に関係する独奏の立場からの要因をreverberance, support, timbre, dynamics、合奏ではhearing each other, time delayの計6要因にまとめている。さらに電気音響実験設備を用いた演奏者相互の実験を行い、⁴⁾ 総合的な音響評価量として初期80～100 msecまでの到来エネルギーによるSupport[ST]とEarly Ensemble Time[EEL]を提案している。

上記の音響評価量は、ステージの演奏者間の評価には有効ではあるが、ステージの形態設計には利用しにくい。また、これまでにス

テージ形態と音響効果に関する系統的な研究はみられない。

以上に背景に対して、本研究は、ステージの形態設計への適用を目的としてエンドステージの形態に対する音響特性と主観効果の関係を明らかにする事にある。そこで、エンドステージの形態を8種類に類型化して、演奏者と客席前方の聴衆に与える音響効果をコンピュータシミュレーションによって検討を行った。さらに、ステージ形態の音響模型実験によるインパルス応答から物理的な音響特性を比較するとともに、模型実験の結果を利用した聴感実験からステージ形態と主観効果の関係について検討を行った。

2. 研究の範囲

本研究で対象とする空間は2000人規模のホールのエンドステージであり、今回は客席空間は考慮していない。この理由としては、演奏者に必要な音響情報が100 msec以内の初期応答にあり、想定したホール規模ではステージ内の初期応答が支配的であるためスポット室等からの時間遅れの反射音は省略しても有効な情報が得られると判断したことによる。

ステージ演奏音の検討経路は、演奏者の近傍に限定せず、ステー

*1 (株)清水建設技術研究所設備技術研究部 主席研究員
(〒135 江東区越中島3-4-17)

*2 日本大学理工学部建築学科 教授・工博

*1 Chief Research Engineer, SHIMIZU Corporation, Institute of Technology Facilities Engineering Department

*2 Professor, Dept. of Architecture College of Science & Technology, Nihon University, Dr. Eng.

ジの平面的な広がりやを考慮して指揮者及び前方客席への経路も対象とした。また、聴感実験の評価量としては、総合的な「演奏のし易さ」等を直接問うのではなく、基本的な評価構成因子である量的因子、質的因子、及び空間的因子を取り上げた。

対象としたステージの形態は表1に示す8種類であり、矩形（Sタイプ）と扇形（Fタイプ）の2種に大別される。さらに反射板の形状はフラット、拡散、縦波、及び横波の4種類を組み合わせで構成してあり、図1にユニット寸法の例を示す。

なお、ステージ上の演奏者は初期応答に大きく影響することが予測されたため、オーケストラがいる条件と空室条件の2者について検討を行った。

3. 音響エネルギー流のシミュレーション

3.1 音響シミュレーション

ステージ上で発生した音響エネルギーのマクロな流れを把握するため、1) 式のエネルギーバランス式を仮定した。すなわち、全音響放射エネルギー (I_W) を時間経過とともにステージ開口から客席空間に放射される総エネルギー (I_{RA})、ステージ空間に残るエネルギー (I_{RE})、及び反射面または演奏者によって吸収されるエネルギー (I_{AB}) 3要素に分けて考える。

$$I_{RE}(t) = I_W - I_{RA}(t) - I_{AB}(t) \quad \dots\dots\dots 1)$$

但し、 I_W : ステージ空間に放射された全エネルギー

$I_{RE}(t)$: 時刻 t におけるステージ空間に存在する総エネルギー

$I_{RA}(t)$: 時刻 0 から時刻 t までにステージ開口に入射する総エネルギー

$I_{AB}(t)$: 時刻 0 から時刻 t までに反射面または演奏者によって吸収される 総エネルギー

以上の各エネルギー量は、音線法(The Sound Ray Tracing Method)を用いて、150 msecまでの反射音経路から計算した。なお、オ

ーケストラ部分とS-2とF-2タイプの拡散壁は完全拡散を仮定した。具体的には、各音線が拡散壁に入射した後に、反射方向が一樣乱数で決定される等エネルギーの2つの音線に分割して伝播計算を継続した⁵⁾。

3.2. 音響計算条件

計算条件は、図2に配置を示すフルオーケストラの有無の2条件とした。音源位置は、ステージ端に近い弦楽器位置に相当するA点と、ステージ奥の打楽器位置に相当するB点の2カ所である。計算に用いた吸音率は、床と天井反射板、側方反射板及び後方反射板はいずれも0.1、またオーケストラ部分は0.4である。

3.3. シミュレーションの結果と考察

音響シミュレーションの結果例を図3～7に示し、主な特徴を次に述べる。

○ステージ開口から放射されるエネルギー (I_{RA}) は、立上がり傾向が音響放射後30 msec以降でSタイプ(実線)とFタイプ(点線)で2分化される。その中で、拡散処理したF-2はSタイプと似た I_{RA} が比較的小さい傾向を示している。また、各タイプ間の I_{RA} の差異は、音響放射60 msec以降で約10%に収束する傾向がみられる。(図3～4)

○音源位置の比較では、 I_{RA} は音源位置からステージ開口までの距離に依存して初期の差異は大きい、60 msec以降にはステージ形態に依存して収束する傾向がみられる。(図5)

○オーケストラ(演奏者)の有無による比較では、 I_{RA} は15 msec以降から差異が生じ初め、50 msec以降には差異が大きくなる。一方 I_{AB} は、音響放射直後から約15%程度の一定の差異で時間推移する傾向がみられる。(図6)

○ステージ空間で吸収されるエネルギー (I_{AB}) はステージ形態への依存性は小さく、オーケストラがいない条件では18%、いる条件では35%程度に収束してる。(図3～4)

表1. 検討対象のステージ形態一覧

	単位: mm			
	形態①	形態②	形態③	形態④
立面 (正面)				
平面 (側面)				
矩形	① S-1	② S-2	③ S-3	④ S-4
扇形	⑤ F-1	⑥ F-2	⑦ F-3	⑧ F-4

注) 正面図は扇形の場合を示す。

図1. ステージ形態のユニット寸法例

図2. 音源と演奏者の位置

○ステージ空間に残るエネルギー (I_{RE}) の減衰性状を全放射エネルギーに対する対数で表示すると、Fタイプではステージ形態による差異が50 msec以降に生じ始め、80 msecで約5dBとなる。また、拡散処理をしたF-2は、ステージ空間内に多くのエネルギーが残るために緩やかな減衰勾配を示す。(図7)

以上の結果から、ステージエネルギーの流れ I_{RA} と I_{RE} の関係からステージ形態を評価ができる可能性を示している。そこで、他の研究成果にみられる80 msec¹⁾に着目して両者の関係を求めた。その結果は図8に示す様に、ステージ形態に依存する音響上の特徴があらわれている。

4. 音響縮尺模型による検討

4. 1. ステージ形態と音響縮尺模型

表1の8種類のステージ形態を、1/10縮尺で音響縮尺模型を製作した。これらの音響模型の特徴を次に述べる。

- (1) 拡散面は、底辺が正方形 (50 x 50 mm)、断面が三角形 ($h=2.5$ mm) の拡散ユニットを水平と垂直に交互に貼りつけた。
- (2) オーケストラ部分には、パイプ椅子とともに演奏者に相当する着衣のダミー吸音体を80体座らせた。
- (3) 前方客席部として、ステージ端部から8列分を設置した。

4. 2. 聴感実験による音響模型の有効性確認

(1) 予備実験

ステージ空間のインパルス応答は、継続時間が300 msec以内で残

響も少ない。そこで、ステージ形状の差異を聴感上判断できるか否かを予備実験で確認する事にした。6) ステージ模型は、スチレンボード系の材料を用いて表1の8種類の簡易モデルを製作した。

インパルス応答の測定は耳介の無い1/10ダミーヘッドで行い、ドライソースを畳み込んで試験音として用いた。一対比較法の主観評価実験を実施した結果、ステージ形態に対応する一連の傾向が確認できたため、本実験では、製作精度を改善したステージ模型を用いるとともに、耳介付きの1/10ダミーヘッドの使用、SN比の改善、周波数の高帯域化等の測定システムの改良を行った。

(2) 本実験のステージ模型

ステージ模型は、予備実験と同じ表1に示す8種類を新たにランバーコア (15 mm厚) を主材料として製作した。さらに、平滑化処理を行った後に、ラッカ塗装によって反射性に仕上げた。ステージ模型の例を図9-(a),(b)に示す。

4. 3. 実験手法と実験設備

音源位置は、コンピュータシミュレーションで設定した図2の2点 (A点とB点) に加えて、ホルン位置に相当するC点の合計3カ所に設定した。受信位置は、演奏者3カ所に加えて、指揮者位置 (D点) と前方客席部 (E点) の合計5点に設定した。

実験のブロックダイアグラムを図10に示す。音源信号は、3.9 μ sec のパルスを用いて、無指向性プラズマスピーカーから再生した。受信はダミーヘッドの左右の耳介内に組み込んだ1/8インチのマイクロフォンで行った。受信信号は、SNの改善と測定時間

図3. I_{RA} 、 I_{AB} とステージ形態の比較 (1)

図5. I_{RA} と I_{AB} の音源位置による比較

図7. I_{RE} の時間応答曲線

図4. I_{RA} 、 I_{AB} とステージ形態の比較 (2)

図6. I_{RA} と I_{AB} の演奏者の有無による比較

図8. I_{RA} と I_{RE} の関係

の短縮化を考慮して、16回の同期加算を行った。音源信号と受音信号の同期加算処理はFFT行い、その制御はパーソナルコンピュータ(HP-9122C)で行った。なお、サンプリング周波数は256kHz、取り込み時間は実時間換算で320msecである。

4. 4. 測定結果と考察

模型実験から得られたインパルス応答の例を図11(a)~(c)に示し、主な特徴を次に述べる。

(1) インパルス応答の比較

- 矩形のS-1タイプでは25msec周期でエネルギーの大きな反射音がみられるが、拡散処理を施したS-2タイプでは解消される。

(図11(a))

- S-1のオーケストラの有無の比較からは、演奏者相互間では直接音と反射音の両者が演奏者の影響を受けることが認められる。この主原因は音源の高さと受音高さに差異が無い事にあり、オーケストラの有無による300msecまでの総エネルギー比は1.90倍(10dB, 1000Hz)であった。(図11(b))

一方、演奏者~指揮者間においても、直接音の到達後25msec付近にみられた強い反射音がオーケストラによって減衰する事が認められるが、音源と受音位置の高さに差が600mm(実物換算)あるため、演奏者相互間と比較すると直接音の変化は少ない。

(図11(c))

(2) 受音エネルギーの立ち上がり曲線

演奏者に対しては初期応答が重要であり、その影響を5msec以降の総エネルギーの立ち上がり曲線を計算してその影響を検討した。図12に結果を示す様に、反射板がフラットなS-1の場合には25msec以内にエネルギーが集中するのに対して、拡散処理をしたS-2では周波数によらず緩やかな立ち上がり傾向が認められる。

図9. ステージ模型例 (上; (a) F-2, 下; (b) F-3)

図10. 音響模型実験のブロックダイアグラム

図11. インパルス応答の比較例

図12. 反射音の立ち上がり曲線

以上、インパルス応答からは、オーケストラがいない条件では床と側方反射板を経由する多く反射音経路が構成されるが、演奏者によって大きく変化する。この結果から、演奏者の影響を受けない天井反射板からの反射経路が重要である事が示された。

5. 一対比較法による主観評価実験

5. 1. 実験手法と実験設備

(1) 評価量

ステージ演奏音を多面的に評価するため、音の基本構成因子である量的因子（音の大きさや、響きの量）、質的因子（響きの質、きらびやかさ、温かさ）空間的因子（拡がり感、接近感、方向感）の計8項目を取り上げ、総合評価量として「好ましさ」を加えた。

(2) 試験音

実験に用いたドライソースは、長さ約10秒のオリジナルの楽音である。これは、前半部で響きの量を判別する立ち上がりが鋭く減衰の早い短い音、中盤は和音の重なりを中心に調和と響きの質を、後半は両者を組み合わせた構成となっている。模型実験で得られた両耳のインパルス応答はドライソースを畳み込み、DATに録音した。試験音の提示用には、DATで各試験音を組み合わせて編集を行った。

(3) 聴感実験

実験は一般事務所程度の暗騒音レベルの室で行い、2台のヘッドホン（STAX-SR）を用いて2人の被験者に同時に試験音を提示した。実験は一対比較法を用いて、音源と受音点は固定した条件でステージ形態を変化させた1組の試験音を交互に被験者に提示して差異を判断させた。

(4) 被験者と教示

被験者は、20～24歳の正常な聴力を有する男女学生合計35名である。被験者には、試験音が残響の短いステージ空間内の演奏音である事を教示して、予備実験で慣れた後に本実験を行った。

演奏者～演奏者（A点→B点）

演奏者～指揮者（C点→D点）

演奏者～前方客席（B点→E点）

ステージ形式

①: S-1 ②: S-2 ③: S-3 ④: S-4
⑤: F-1 ⑥: F-2 ⑦: F-3 ⑧: F-4

図13. サーストンCASE Vによる基準化

表2. 演奏音の伝達経路と好まれるステージ形態

伝達経路	好まれる形態	初期応答の特徴
演奏者相互間	② S-2 ③ S-3	ステージ空間に拡散される
演奏者から指揮者	④ S-4 ⑦ F-3	
演奏者から前方客席	⑥ F-2 ⑧ F-4	客席部へ放射しやすい

実験結果は、サーストンのCASEVによって尺度化し、平均＝5、標準偏差＝2で基準化した。今回の模型実験の精度を含めて、抽出された有意性の高い要因を抽出して、相関の高い複数の変数については一方を採用した。これらの有意検定（危険率5%）の結果からは各評価尺度とも有意と判断されたが、「好ましき」については各被験者の嗜好の差が影響したためか、打楽器～客席部間（A点→B点）の経路では有意差は得られなかった。

（2）主観評価の特徴

比較的明らかな評価傾向が確認された3経路の平均評価を図13に示し、特徴を次に述べる。

○演奏者～演奏者間（A点→B点）

受音点はオーケストラの最後部に位置するため、後部反射板の影響を受けやすい。拡散処理を施したS-2とF-2はステージ空間に反射音が残る、各評価量と「好ましき」はいずれも評価が高い。同様に、縦波折板のS-3とF-3の評価も高い。一方、横波折板のS-4とF-4は初期の時点からステージ開口から客席空間に音が放射されて、相対的に評価が低い。

○演奏者～指揮者間（C点→D点）

受音位置はステージ中央部であり、横波折板のS-4は全ての評価量で評価が高い。また、縦波折板のS-3とF-3も比較的评价が高い。なお、拡散処理を施したS-2とF-2は「温かさ」以外の評価量はほぼ似た評価となっている。

○演奏者～前方客席間（B点→E点）

扇形Fタイプは横波折板のF-4と拡散処理を施したF-2の評価が高い。また、矩形Sタイプでは横波折板のS-4の評価が高い。

以上の結果から、ステージ形態の評価傾向は伝達経路の相違とともに矩形Sタイプから扇形Fタイプへと変化しており、演奏者側からと客席側からの2面性をもつことが確認された。つまり、演奏者、指揮者または前方客席の位置でそれぞれ好ましいとされるステージ形態が異なり、反射板を拡散処理または縦波折板形状とした場合には初期応答がステージ空間で音が拡散され、また横波折板では客席方向への初期応答が幾何学的な経路で伝播される、それぞれの特徴を反映していると考えられる。実際のステージ形態を想定したS-2～4とF-2～4に対しては、「ステージの形態」と「好ましき」の関係を表2の様にまとめることができる。

5. まとめ

エンドステージの形態を8種類に類型化して、オーケストラ演奏に対する音響特性と主観評価に与える影響をコンピュータシミュレーション、音響模型実験及び聴感実験の3手法から検討した。

本研究で得られた結果を、まとめて次に示す。

- 1) ステージ形態に依存する音響特性は、80msecまでのステージ空間に残存するエネルギーとステージ開口から放射されるマクロなエネルギー量によって説明できる可能性が示された。音響上の詳細検討の段階では当然反射音の初期応答のチェックが必要と

考えるが、ステージの形態設計にはこれらのステージ空間と客席空間のエネルギーの最適なバランス関係を見いだす事によって有効に活用できると考える。

- 2) 演奏者、指揮者または聴衆の各受音位置によってそれぞれ好まれるステージ形態は異なり、演奏者相互間では反射板を拡散処理を施したステージ形態が共通して評価が高い。一方、前方客席では扇形のステージ形態が好まれており、いずれも初期のエネルギー比率が主観評価に大きく寄与しているものと判断される。
- 3) ステージ上のオーケストラの有無、即ち演奏者によってステージ空間の初期応答とともに客席空間へ放射されるエネルギーの性状が大きく変化する事が明らかになった。この結果から、演奏者の影響を受けにくい天井反射板の形状とともに、座席列の勾配やステージの段床勾配が音響上重要である事が再確認できた。

6. 謝辞

本研究の論文をまとめるに際して、音響模型実験ならびに聴感実験に協力いただいた鎌田国浩氏（現沖電気（株）勤務）ならびに鎌倉貴志氏（日本大学大理工学部大学院）に本稿の結びにあたり感謝の意を表す次第である。

参考文献

- 1) 関口 克明、"室内音響特性の評価" 日本音響学会誌 46、(8) 1990
- 2) A.H.M. Marshall, D.G. Ottoband, A. Iruts, "acoustical conditions preferred for ensemble," J.Acoust. Soc. Am. 64, pp1437-1442, 1978
- 3) A.C.G. Ade, "musicians ideas about room acoustical qualities," Report No. 31, The Acoustics Lab, Tech. Univ. Denmark (1982)
- 4) A.C.G. Ade, "Subjective room acoustic experiments with musicians," Report No. 32, The Acoustics Lab, Tech. Univ. Denmark (1982)
- 5) 中川、"電算機による音場シミュレーションの建築音響への適用" 音響学会建築音響研究会資料AA-87-37
- 6) 鎌田 国広、関口 克明、中川 清、"音響模型実験による音場解析" 日本音響学会 学術講演梗概集 PP.329～330, 1993

[1996年6月28日原稿受理 1996年9月10日採用決定]