

# ステージ音場の反射音方向分布と演奏しやすさに関する研究

飯塚 亜希子

## 1. はじめに

### 1.1 背景

コンサートホール音場に関しては、客席を主な対象とし、これまでに様々な評価指標やそれらの推奨値が提案されるなど、良い響きのコンサートホールを設計するために研究がなされてきた。しかし、ステージについては、音場の解明が十分になされているとは言い難い。聴衆により音楽を提供するためには、演奏者が気持ちよく演奏できるステージ音場を創り出すこともとても重要であり、音場の特性とそのあり方を検討していく必要があると考える。

ステージ音響に関しては、Gade<sup>1)</sup>による評価指標 *ST* の提案をはじめとして、実測による検討<sup>2)</sup> やシミュレーションによって客席後部からの反射音や初期反射音について検討した報告<sup>3)4)5)6)</sup> がある。実際のステージ音場は、反射音の方向分布や時間遅れなど非常に複雑であると考えられるが、*ST* は反射音の時間情報のみに着目しており、方向情報は考慮されていない。客席空間においては、側方初期音が「拡がり感」に関連するなど、反射音の方向分布も重要な要因となっている。

そこで、本研究室では、ステージ空間においても反射音の方向分布が演奏に影響するのではないかと考え、ステージ音響の評価方法を提案するために研究を行っている。

### 1.2 目的

本研究では、反射音方向分布と演奏しやすさに着目し、3つの心理実験と既存ホールステージの測定を行った。各検討の目的を下記に述べる。

- 1) 音響心理実験 I  
初期反射音の方向分布が演奏しやすさに影響するかどうかを確認する
- 2) ステージ音場の測定  
実験 I の音場は模擬的に設定されたものであったため、実ステージ音場の特性を把握し、実験で使用するためのデータを得る
- 3) 音響心理実験 II  
実際のステージ上を想定した音場でも、演奏者は音場の違いを理解するのかどうかを確認する
- 4) 音響心理実験 III  
反射音方向分布の変化が演奏しやすさに与える影響を検討する

## 2. 音響心理実験 I

### 2.1 実験音場

被験者の演奏音を単一指向性マイクロホンで収録し、これにステージを模したインパルス応答をリアルタイムに畳込み、無響室内の半径 1.5m の半球面上に配置した左右、上、前後の 5 個のスピーカ (実験 I では下方向のスピーカは設置されていない) から反射音として発生させる (図-1)。被験者は演奏音と反射音を聴き演奏しながら、音場を評価する。畳込みには、既存のコンサートホールのステージにおいて無指向性マイクロホンによって測定<sup>7)</sup> した 1 種類のインパルス応答を用い、直接音成分 (0-10ms) を除き、初期反射音 (10-80ms) エネルギー率が表-1 に示す値になるよう振幅を変化させ、5 音場を設定した。音場 4 は初期音の方向分布が最も均等な音場、音場 1, 2, 3, 5 は、それぞれ前方、後方、上方、側方の初期音を強くした音場である。

### 2.2 実験方法

5 音場を対にし (全 10 対)、ランダムに提示した。被験者はクラリネットの演奏経験 15 年程度のアマチュア奏者 3 名である。「音の残り方の良し悪し」「吹いている時の響きの量」「吹いている時の響きの量の好み」「演奏している空間の広さの印象」「演奏している空間の広さの印象の好み」「総合的にみた演奏しやすさ」の 6 項目について、一対比較法により音場の評価を求め、前後を比較して感じたことは自由に記述してもらった。

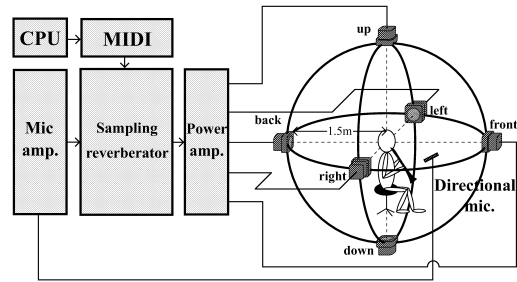


図-1 実験システムのブロックダイアグラム

表-1 実験音場

Sound field No.	Sound energy ratio of directional early reflection				
	lateral	(right left)	vertical	back	front
1	0.30	(0.15 0.15)	0.15	0.15	0.40
2	0.30	(0.15 0.15)	0.15	0.40	0.15
3	0.30	(0.15 0.15)	0.40	0.15	0.15
4	0.40	(0.20 0.20)	0.20	0.20	0.20
5	0.60	(0.30 0.30)	0.15	0.15	0.10

評価は、一音場約2分の間に、速い・普通・遅いテンポの曲、ロングトーン、スタッカートを含めて、自由に演奏してもらった。

### 2.3 実験結果および考察

実験は、被験者2人×2回、1人×1回の計5回行った。得られた回答から Thurstone Case V に基づく間隔尺度値を算出した。結果を図-2 に示す。

全体的に音場5の評価が高く、音場4の評価が低い傾向となった。「響きの量の好み」については、多ければ良いという訳ではなく適度な強さが求められる。「空間の広さの印象」と「空間の広さの印象の好み」の尺度値はほぼ対応しており、「広い」と感じられた側方初期音の強い音場5が好まれる。逆に「狭い」と感じられた音場4は印象が悪く、「硬い壁に囲まれたような感じ」「狭くて響きが近い」「周りだけで響いている」などとコメントがされている。総合的評価の「演奏しやすさ」においても、音場5の評価が高く、音場4の評価が最も低かった。

以上より、側方の強い音場は評価が高く、反射音が全方向均等な音場は評価が低いという結果が得られ、初期部分でも反射音の方向分布が演奏に影響することが明らかとなった。

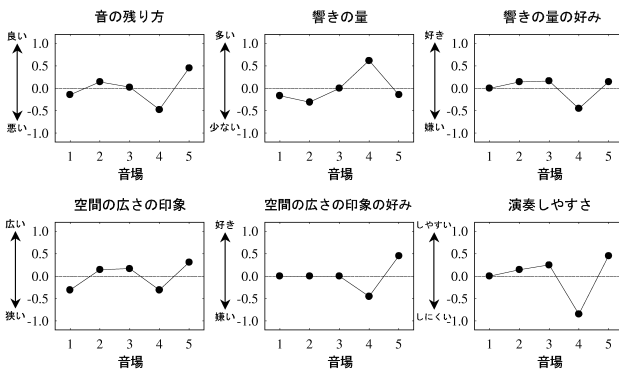


図-2 各評価の尺度値 (実験 I)

## 3. ステージ音場の測定

### 3.1 測定対象と方法

測定は、ワンフロアの多目的ホールの Hall F、プロセニウム型の劇場指向の Hall K、シューボックス形状の Hall H の3ホールで行った (表-2)。

音源には12面体無指向性スピーカを、受音には無指向性マイクロホンと単一指向性マイクロホンを用いた。音源からスイープパルスを発生させ、同期加算法により時間応答波形を観測した。マイクロホンは、音源が常に受音点の前方(客席側)にあるように設置し、方向情報は、単一指向性マイクロホンの指向軸を、後・前・左・右・下・上の6方向に向けることにより測定した。音源とマイクロホンは、STの測定を目的としたAパターン(音源高さ:1.2m, 受音点高さ1.2m, 距離1.0m)、立奏を想定したBパターン(測定点数が少ないため分析より省く)、座奏を想定したCパターン(音源

高さ:0.95m, 受音点高さ1.1m, 距離0.5m)の3種類に設定した。測定点を図-3 に示す。

### 3.2 解析

測定されたインパルス応答から、(1)式に基づきSTを算出した。周波数範囲は、125~4kHz(6オクターブバンド幅)を対象とした。

$$ST = \int_{10\text{ms}}^{100\text{ms}} p^2(t)dt / \int_{0\text{ms}}^{5\text{ms}} p^2(t)dt \quad (1)$$

また、方向別反射音エネルギーの全反射音エネルギーに対する割合を、方向別反射音エネルギー比として定義し、一例を(2)式に示す。

$$FR = \int_{5\text{ms}}^{100\text{ms}} p_f^2(t)dt / \sum_j \int_{5\text{ms}}^{100\text{ms}} p_j^2(t)dt \quad (2)$$

ここで  $p_f(t)$  は、単一指向性マイクロホンの指向軸を前に向けて得られた音圧を示す。添え字  $j$  は指向軸の各方向を示す。FRは前, BRは後, LRは左, RRは右, URは上, DRは下の反射音エネルギー比を表す。

### 3.3 STと反射音方向特性

STは、Aパターンの場合、壁に近い測定点(F07, K04, K07, H07)を除くと-10.0~-15.0dB程度である。Cパターンの場合、Aパターンに比べ値が小さくなる傾向があり、測定パターンの違いによってSTの値には大きな差が生じていた。また、STは、舞台上の位置とステージ周壁までの距離と関連が大きいことが示唆された。

次に、測定点K01とH04に着目し、それらの反射音方向特性を図-4(a)に示す。STの値は、両測定点とも約-10dBとほぼ等しいが、側方からの反射音エネルギー比に大きな差がみられる。同様に、STの値が約-9dBで等しい測定点K03とH07は、ステージ後壁までの距離が異なるため、図-4(b)を見るとBRに大きな差があることがわかる。

実験Iから初期反射音の方向分布が演奏しやすさに影響するという知見を得ているので、反射音方向特性が異なるとSTの値だけでは演奏への影響を十分に評価できない場合があることが予想される。

表-2 対象ホールの音響緒元

Hall	Seats	V (m <sup>3</sup> )	S (m <sup>2</sup> )	S <sub>0</sub> (m <sup>2</sup> )	V/S (m)	RT (s)	$\bar{\alpha}$
F	775	6,403	2,336	145	2.74	1.36	0.28
K	1,269	9,200	3,800	161	2.42	1.52	0.22
H	720	8,300	3,300	147	2.52	1.85	0.20

S<sub>0</sub>:ステージ床面積

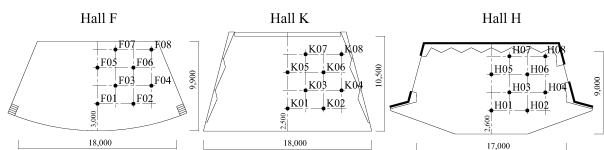


図-3 測定点

## 4. 音響心理実験 II

### 4.1 実験音場

実験システムは基本的に実験 I と変わらないが、実験 II, III では下方向のスピーカを加え、6 方向 (左右, 上下, 前後) から反射音が発生できるものにし、より現実に近い音場を構成した。畳込みには、方向別 (6 方向) に測定したインパルス応答 (C パターン) を用い、方向分布 (図-5) やステージ上の位置などが異なる 5 点、F05 (音場 A), F06 (音場 B), K01 (音場 C), H02 (音場 D), H07 (音場 E) を選んだ。なお、直接音成分 (0-5ms) を除外した。各音場の 5-100ms までの反射音エネルギーから算出した相対音圧レベルは、音場 A を基準とすると、音場 A~D は差が 1dB 以内であるが、音場 E はやや大きく 2.6dB である。音場 A は左右と前後のエネルギー比がほぼ等しく、音場 B は左右のエネルギー比に差がある。音場 C は、前後のエネルギー比に差があり、音場 D は、左右も前後もエネルギー比が大きく異なる。音場 E は後と下のエネルギー比がほぼ等しい音場である。

### 4.2 実験方法

5 音場を対にし (全 10 対) ランダムに提示した。被験者は、10~15 年程度の演奏経験を有するアマチュアのクラリネット奏者 3 名である。演奏方法は実験 I と共通である。「吹いている時の響き方」「吹いている時の響き方の好み」「演奏している空間の印象」「演奏している空間の印象の好み」「音の残り方の良し悪し」「音のまとまり」「音色」「到達感」「自分の音の聴き取りやすさ」「総合的にみた演奏しやすさ」の 10 項目について、一対比較法により音場の評価を求め、前後を比較して感じたことを自由に記述してもらった。

### 4.3 間隔尺度値

実験は、被験者 3 人 × 3 回の計 9 回行った。得られた回答から Thurstone Case V に基づく間隔尺度値を算出した (図-6)。

まず、全体的に音場 D の評価は高く、音場 C の評価は低い傾向が認められる。「響き方」と「響き方の好み」を見ると、“響き”は適度な量があるようである。「空間の印象」は、音場 D, E は広い、音場 C は狭いと判断され、「空間の印象の好み」は実験 I と同様、広いと感じられる音場が比較的良く評価される傾向となった。しかし、「空間の印象」の評価がほぼ同じ音場 D, E でも、“音場 E は広い印象であったが音場 D に比べホールで吹いているイメージができない”といった意見も

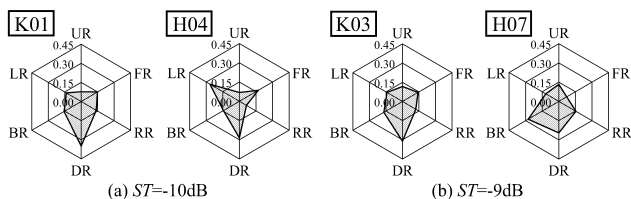


図-4 反射音方向特性の比較 (A パターン)

見られた。「音の残り方」は、判断しやすい項目のようである。「音のまとまり」と「音色」は、有意な差がほとんど認められなかった。「到達感」は被験者間の評価も一致しており、ある程度の響きと広さが感じられると、客席で鳴るイメージも出来るようであった。「自分の音の聴き取りやすさ」からは、響きと自分の音のバランスをどう判断するかは好みに大きく左右されそうであることがわかった。「演奏しやすさ」は「音のまとまり」「自分の音の聴き取りやすさ」以外の項目のいずれとも相関が高く、特に「響き方」と相関が高い (0.94)。以上のように、実際のステージ上でも演奏者は音場の違いを敏感に感じ取っていることが明らかとなった。

### 4.4 残響時間とエネルギーの時間変化の考察

「響き方」や「響き方の好み」の評価は、インパルス応答のエネルギー減衰過程と関連していると考えられるため、残響時間に相当する量を算出し、検討した。初期部分 (0-20ms 程度) の残響時間 ( $RT_{early}$ ) と後期部分 (20ms 以降) の残響時間 ( $RT_{late}$ ) の 2 種類を算出した (図-7)。なお、ここでいう残響時間は一般的な定義と

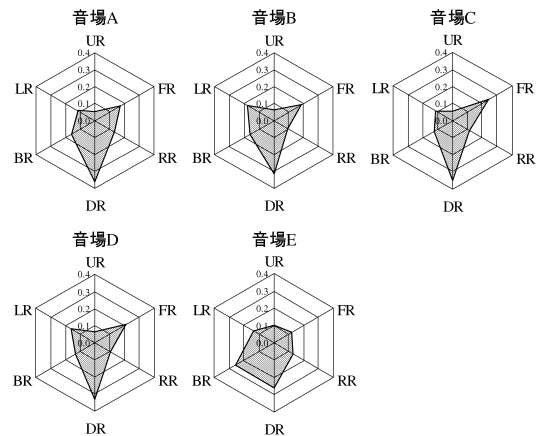


図-5 実験音場の反射音方向分布

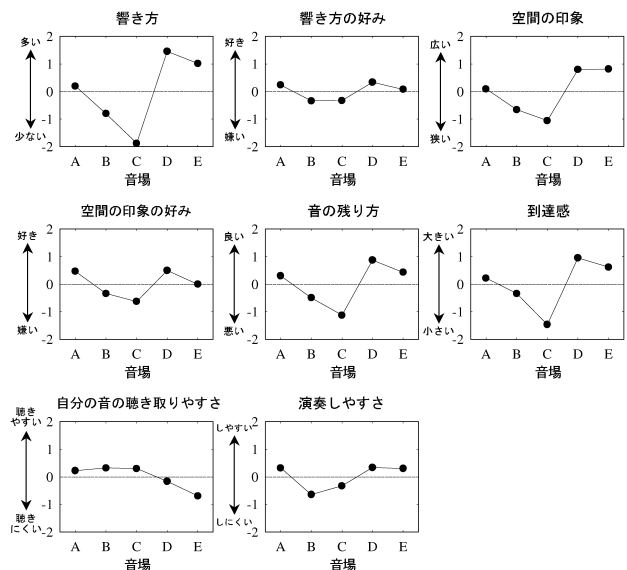


図-6 各評価の尺度値 (実験 II)

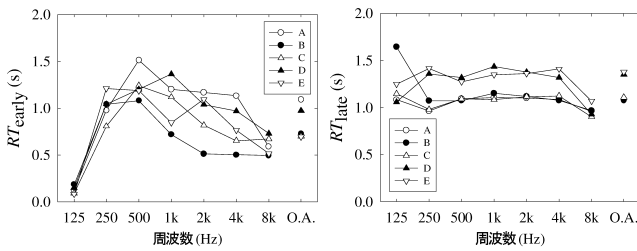


図-7 残響時間

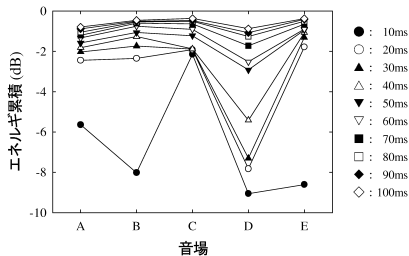


図-8 エネルギー累積の時間変化

は異なる。まず、 $RT_{late}$  をみると、音場 D, E が高い値を示している。被験者の評価でも音場 D, E がよく響くとされ、 $RT_{late}$  と対応していると言える。これに対し、 $RT_{early}$  は音場 A, D がほぼ安定した値 (1.0-1.5s) を取るが、音場 B, C は 1kHz-4kHz にかけて大きく値が落ち込み、「響き方」の評価と一致する。特に音場 B に「響きにむらがある」というコメントがされたのは、周波数ごとの残響時間の差が原因の一つであると考えられる。

次に、エネルギーの時間変化 (図-8) と音場評価の対応をみた。エネルギーの累積は、10ms ごとに加算する反射音エネルギーの全反射音エネルギーを基準にしたレベルを算出している。10ms までの累積で音場 C の値が高く、音場 D が低いという結果は、「響き方」「空間的印象」「到達感」の間隔尺度値と全く逆の傾向を示していた。

これより、初期の反射音エネルギーが演奏しやすさに影響しており、音場を評価する一つの目安となっていることが明らかとなった。

## 5. 音響心理実験Ⅲ

### 5.1 実験音場

音場は 5 音場 (a・b・c・d・e) 設定した。畳込みには、H02(C パターン) で測定したインパルス応答を用いる。このインパルス応答を実験Ⅱの方向分布 (図-5) に一致 (音場 a は音場 A の分布に対応) するよう振幅を変化させた。直接音成分 (0-5ms) は除外する。各音場の相対音圧レベルは、音場 D を基準とし、全音場ほぼ 0dB である。そのため  $ST$  も等しい。実験方法、被験者、質問項目は実験Ⅱと共通である。

### 5.2 実験結果および考察

実験は、被験者 3 人 × 3 回の計 9 回行った。今回は被験者間の評価に違いが出たため、尺度値は算出せず

被験者ごとの考察を行った。

その結果、音場 a・b を良いとする被験者と、音場 a・c を良いとする被験者に意見が分かれたが、どのような方向分布を良いと考えるかには、左右方向のエネルギーを意識するか、または前後方向のエネルギーを意識するかで違いが出ることを示唆された。さらに、 $ST$  の値が等しくても、演奏しやすさには違いがあることが明らかとなった。

## 6. まとめ

本研究では、3 つの心理実験と既存ホールの測定を行い、反射音方向分布と演奏しやすさについて検討した。その結果、次のことが明らかとなった。

### 1) 音響心理実験Ⅰ

側方のエネルギーの強い音場は評価が高く、全方向が均等な音場は評価が低く、初期反射音の方向分布が音場の評価に影響を与える

### 2) ステージ音場の測定

従来の  $ST$  と演奏形態を想定した測定方法で得られる  $ST$  の差が測定点で異なる場合があり、 $ST$  の値が等しい場合でも、反射音の方向特性は大きく異なる

### 3) 音響心理実験Ⅱ

演奏者は実際の音場の違いを敏感に感じ取っており、初期の反射音エネルギーから評価の傾向を見て取れる

### 4) 音響心理実験Ⅲ

反射音の方向分布のみが変化する場合、左右または前後のどちらの反射音エネルギーを意識するかで、被験者により音場の評価に違いがある。また、 $ST$  が近い値であっても、演奏しやすさは異なる

以上より、本研究によって、演奏しやすい音場を考えていく上で、反射音の方向分布を考慮することが示唆された。ステージ音場の評価のためには、反射音方向分布の適正範囲を見出すなど、さらなる検討が必要であると考えられる。

## 参考文献

- 1) A. C. Gade: Investigation of musicians' room acoustics conditions in concert halls. Part II: Field experiments and synthesis of results, *ACUSTICA*, **69**, 249-262, 1989.
- 2) 上野佳奈子, 佐藤史明, 橋秀樹: ホール・ステージ上の音響特性の測定, 日本音響学会講演論文集, 819-820, 1997.
- 3) 上野佳奈子, 佐藤史明, 橋秀樹, 小野隆彦, 千住真理子: ステージ音響に関する研究 - シミュレーション音場におけるバイオリニストによる評価実験 -, 日本音響学会建築音響研究会資料, AA97-5, 1997.
- 4) 廣瀬大輔, 木村翔, 橋本修: 仮想音源分布の異なる音場におけるソロ演奏を想定した主観評価実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 57-58, 1997.
- 5) 中山一郎, 杉村信彦: ヴァイオリン奏者にとって好ましい初期反射音遅れ時間とレベルとの関係, 日本音響学会講演論文集 (春), 713-714, 1992.
- 6) 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 (秋), 837-838, 1998.
- 7) A. Wakuda, H. Furuya, K. Anai and K. Fujimoto: Directional characteristics of late sounds in concert auditoria, *Proc. of FORUM ACUSTICUM SEVILLA 2002*, RBA-02-014, 2002.