

## 音源の指向性が室内音場評価に与える影響：既存 ホールの実測による検討

松尾, 昌美  
九州大学大学院人間環境学府空間システム専攻博士後期課程

古屋, 浩  
九州共立大学工学部建築学科

藤本, 一壽  
九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門

<https://doi.org/10.15017/19025>

---

出版情報：都市・建築学研究. 3, pp.111-116, 2003-01-15. 九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門  
バージョン：  
権利関係：

## 音源の指向性が室内音場評価に与える影響 —既存ホールの実測による検討—

A Study on Effect of Directional Characteristics of Sound Source on Evaluation of Sound Fields by Means of Acoustical Measurement

松尾昌美\*, 古屋 浩\*\*, 藤本一壽\*\*\*

Masami MATSUO, Hiroshi FURUYA and Kazutoshi FUJIMOTO

The purpose of this study is to make clear the effect of the fundamental characteristics of sound source on the stage of auditoria, that is, directivity pattern, orientation of main axis and location of source, on the acoustical properties and the evaluation of sound fields, although they are ordinarily estimated only with an omni-directional source. In our previous works, the results of geometrical simulation showed that the directional characteristic of sound source affected significantly the acoustical quantities such as the ratio of early-to-late sound energy and lateral energy fraction. In this paper, the acoustical measurement is performed in real auditoria to examine the validity of the evaluation with the directional sound source. The result shows that there is a significant difference between the acoustical quantities with an omni-directional loudspeaker and a directional one whose directivity is produced on the basis of measured characteristics of the strings, and that the directional characteristics of sound source are very important factors in the acoustic design of concert auditoria.

**Keywords :** *Directional characteristics of sound source, Acoustical parameters, Physical measurement, Acoustic design*

音源の指向性, 室内音響指標, 物理測定, 音響設計

### 1. はじめに

#### 1.1 研究の背景

近年, 数多くの音楽専用ホールが建設されている中, “室内楽専用ホール”や“ピアノの音を重視したホール”というように演奏種目や音源の特化を謳い文句にした音楽専用ホールが増えつつある。コンサートホール音場の評価においても, 例えば, “客席中央付近はピアノの音量が乏しい”, “2階席は弦の音が非常に澄んでいる”, “後方座席では金管の音が耳につく”というように, 音源の種類に応じた評価がなされることが多い。このことは, 音源(楽器や音声)の有する性質が音場の評価に重要な意味を持つことを示している。

しかしながら, コンサートホールの設計時における音場予測や竣工時の音響測定は, 舞台中央に設置した無指向性音源を用いて行われるのが従来から一般的となっている。これは, 音場の基本的な音響特性を把握する上で簡便で実用的な方法であると思われるが, 個々の楽器の有する音響特性を考慮していないため, 上述のような, 演奏会に

における実際の聴感印象の評価にはつながらない。

#### 1.2 研究の目的

コンサートホール音場の評価は, 演奏者(音源特性), ホール空間(伝達特性)および聴き手(心理評価)の3者の関連の上に成り立つ。本研究は, 従来から無指向性と想定されてきた音場評価用音源の特性に, 実際の楽器の特性を反映させることにより, 演奏される音楽に対応したコンサートホール音場の評価法を見出そうとするものである。

これまで, 研究の第一段階として, 指向性の鋭さ, 指向軸の向きおよび音源の位置の3つの要素によりモデル化した指向性音源と, 無指向性音源を用いて得られる室内音響物理量の値の違いについて, 単純な形状のホールモデルと既存ホールをモデル化したホールを対象に, 幾何音響シミュレーションにより検討し, 音源の指向性は室内音響物理量に有意な影響を及ぼすこと, したがって音源の特性を考慮することはコンサートホール音場の評価に重要であることを示した<sup>1)</sup>。

#### 1.3 本論文の目的

本論文は, 研究の第二段階として, 実際のホール音場を対象にした音響測定から, 音源の指向性が音場の物理特性に有意な影響を及ぼすことを示し, 音源の特性を考慮す

\* 空間システム専攻博士後期課程

\*\* 九州共立大学工学部建築学科

\*\*\* 都市・建築学部門

ることがコンサートホール音場の評価に重要であることを再検証することを目的とする。

まず初めに、実際の楽器の指向性を測定し、得られたデータを基に音響測定用の指向性音源スピーカを開発する。そして、開発した指向性音源と従来から用いられている無指向性音源を用いて既存のホールの音場測定を実施し、両音源による室内音響物理量に有意な差が生じることを示す。

## 2. 弦楽器の指向特性の測定

楽器の指向特性はこれまでも2, 3の測定データ<sup>2)</sup>が示されているが、いずれも測定条件が明確でないため音場評価用の音源指向性モデルとして利用することができない。そこで、楽器の指向性を把握するために、オーケストラや室内楽で用いられる代表的な楽器の一つであるバイオリンとビオラを対象に指向特性の測定を行った。

### 2.1 測定方法

無響室内において、架台に固定された楽器をアマチュア演奏家にできるだけ定常的な音となるように演奏してもらい、1/3 オクターブバンド音圧レベル(2秒間のエネルギー平均値)を測定した。測定対象は、バイオリン2本とビオラ2本であり、演奏者は楽器ごとに異なる。演奏は、各楽器の4本の開放弦(バイオリン:G線(196 Hz), D線(294 Hz), A線(440 Hz), E線(659 Hz), ビオラ:C線(131 Hz), G線(196 Hz), D線(294 Hz), A線(440 Hz), 括弧内は基音を示す)のdown-bowによった。測定のブロックダイアグラムをFig.1に示す。指向特性を3次元的に把握するために、測定点は楽器の駒から等距離(1m)の球面上に、x-y平面, x-z平面, y-z平面それぞれについて15°ステップに計61点を設けた。

指向特性の測定と同時に、楽器に近接して設置した基準点における音圧レベルを測定し、演奏ごとのパワーレベルのばらつきの補正に用いた。

### 2.2 測定結果

演奏者(楽器)の違いによる指向特性の差はほとんど認められなかったため、バイオリンおよびビオラの各弦から得られた値の算術平均値を測定結果とした。楽器の前後左

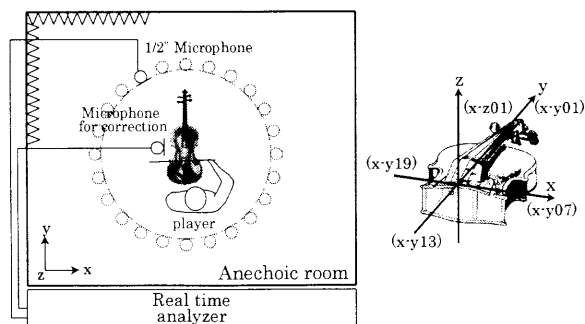


Fig.1 Block diagram of measurement of directional characteristics.

右並びに上方の計5点における周波数特性を、x-y01点における1k Hzの値を基準(0dB)として、Fig.2に示す。測定点による差は、低周波数帯域で小さく、高周波数帯域で大きい。500Hzと1k Hzの結果をFig.3に示す。バイオリンおよびビオラの主要帯域とされる1k Hzでは、y-z平面内、すなわち楽器の表側(f字孔側)に鋭い指向性がみられる。

## 3. 音場測定用指向性音源の開発

得られた弦楽器の指向特性を基に、音場測定用の指向性音源スピーカを開発した。

音源スピーカの構成は、正12面体木製箱の密閉型エンクロージャに、12個のフルレンジ型スピーカユニット(100mmφ)を組み込んだものとし、各スピーカユニットへの入力レベルを個別に調節することでスピーカ全体の指向性

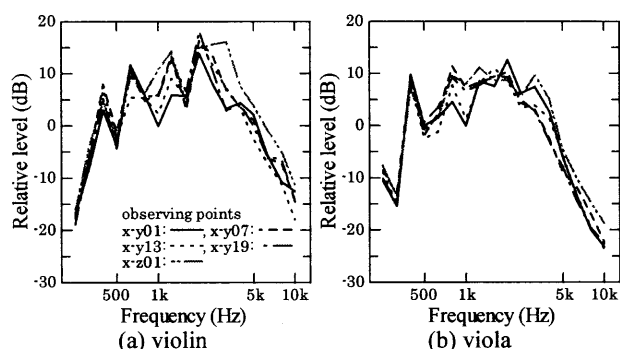


Fig.2 Frequency characteristics of a violin and a viola (averaged over four open-strings).

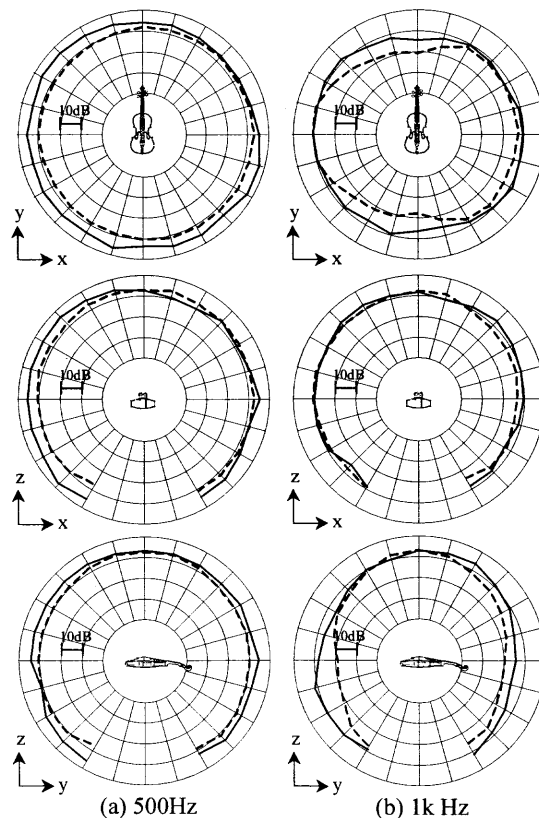


Fig.3 Directional characteristics: —, the strings; ----, directional loudspeaker.

を制御した。指向特性の測定には、音源ソースとしてピンクノイズを用い、1/3 オクターブバンド音圧レベル(10 秒間のエネルギー平均値)を測定した。

弦楽器の指向特性を目標に調整した音源スピーカの指向特性を、弦楽器と併せて Fig.3 に示す。500 Hz における最大値と最小値の差は、弦楽器では 7.6dB であり、開発したスピーカでは 7.7dB である。指向性が鋭い 1k Hz の y-z 平面内においては、弦楽器では、楽器の真上方向より 60° 方向において 8.2dB 減衰しているのに対して、スピーカでは 8.6dB である。

なお、指向性を制御しない場合の本スピーカシステムの指向特性は、125~1k Hz で±2dB 以下(1k Hz:±1dB), 2k Hz で±3dB であり、125~2k Hz の範囲ではほぼ無指向性である。

#### 4. 既存ホールにおける音響測定

音源の指向性の違いによる室内音響物理量の差異を検討するために、開発した指向性音源スピーカと従来から用いられている無指向性音源スピーカを用い、既存の 6 つのホールにおいて音場測定を行った。

##### 4.1 測定の概要

測定は、1,500~1,800 席規模の 3 つの音楽専用ホール(Hall A, B, C)と 3 つの多目的ホール(Hall D, E, F)において行った。ホールの諸元を Table 1 に示す。舞台中央に設置した正 12 面体スピーカ(指向性, 無指向性)から M 系列ノイズを発生し、相互相関法によりインパルス応答を測定した。指向性音源の指向軸(Fig.3, z 軸)は、筆者ら<sup>3)</sup>が提案している室内楽用標準音源の指向軸(舞台から見て右前上方の方向: 下手より水平角 60°, 仰角 75°)とした。観測点は場内一様に 24~36 点設け、受音は 4 チャンネルマイクロフォンシステムを用いた。測定装置のブロックダイアグラムを Fig.4 に示す。

得られたインパルス応答から、時間情報に関する室内音

響物理量  $C_{80}$ ,  $EDT$ , 並びに空間情報に関する室内音響物理量として(1)式に定義する  $LE_{80}$ ,  $VE_{80}$ ,  $GE_{80}$ (初期反射音の全エネルギーに対する横方向, 鉛直方向, 前後方向成分エネルギーの割合)を算出した。ここで,  $p(t)$ は音圧,  $\alpha, \beta$  は各々反射音到来方向の仰角(°)と水平角(°)を表す。

$$LE_{80} = \int_0^{80} (p(t) \cos \alpha \sin \beta)^2 dt / \int_0^{80} p^2(t) dt$$

$$VE_{80} = \int_0^{80} (p(t) \sin \alpha)^2 dt / \int_0^{80} p^2(t) dt \quad (1)$$

$$GE_{80} = \int_0^{80} (p(t) \cos \alpha \cos \beta)^2 dt / \int_0^{80} p^2(t) dt$$

$$\left( -\frac{\pi}{2} \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}, -\pi \leq \beta \leq \pi \right)$$

#### 4.2 測定結果

室内音響物理量の空間分布特性の例を、無指向性音源( $S_0$ )と指向性音源( $S_d$ )の場合を比較して Fig.5(Hall A, B, 1 階席のみ)に示す。

まず,  $C_{80}$ についてみる(Hall B)。音源が無指向性の場合には  $C_{80}$ は場内ではほぼ一様な値を示し、ホール内の測定値の最大値と最小値の差(変化幅)は 2dB である。一方、音源が指向性の場合の変化幅は 4dB であり、大きなばらつきを示す。このことは、2 階席, 3 階席においても同様である。すなわち、無指向性音源の場合の変化幅は、2 階席, 3 階席で各々 3dB, 3dB であるのに対して、指向性音源の場合は 4dB, 6dB となる。

次に,  $EDT$ (Hall B)についてみる。  $C_{80}$ と同様に、無指向性音源の場合の変化幅が 0.48s であるのに対して、指向性音源の場合には 0.61s と大きくなる。

さらに  $LE_{80}$ についてみてみると(Hall A の場合), 1 階席の変化幅は無指向性音源で 9.1%, 指向性音源で 22.4% であり、指向性音源の場合のホール内のばらつきが非常に大きくなっている。また 2 階席, 3 階席を含めてみても、同様に、

Table 1 Outline of surveyed auditoria.

	Hall A	Hall B	Hall C	Hall D	Hall E	Hall F
Seats	1,871	1,818	1,813	1,522	1,780	1,811
V(m <sup>3</sup> )	17,446	17,303	19,410	12,167	13,994	18,700
V/S (m)	2.5	2.8	3.0	2.6	3.4	3.0
V/N (m <sup>3</sup> /seat)	9.3	9.5	10.7	7.5	7.9	10.3
RT <sub>60</sub> <sup>*1</sup>	2.24	1.79	2.08	1.58	1.44	2.20
$\bar{\alpha}$ <sup>*1</sup>	0.17	0.22	0.21	0.23	0.32	0.20
Section						
Plan						
N <sup>*2</sup>	32	36	32	36	24	24

\*1 Averaged over four octave bands from 250 to 2k Hz

\*2 The number of measuring points in the seating area

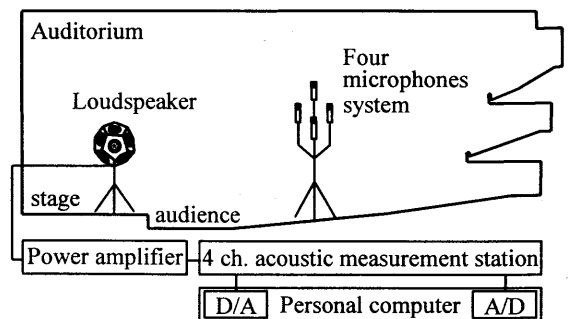


Fig.4 Block diagram of hall measurement.

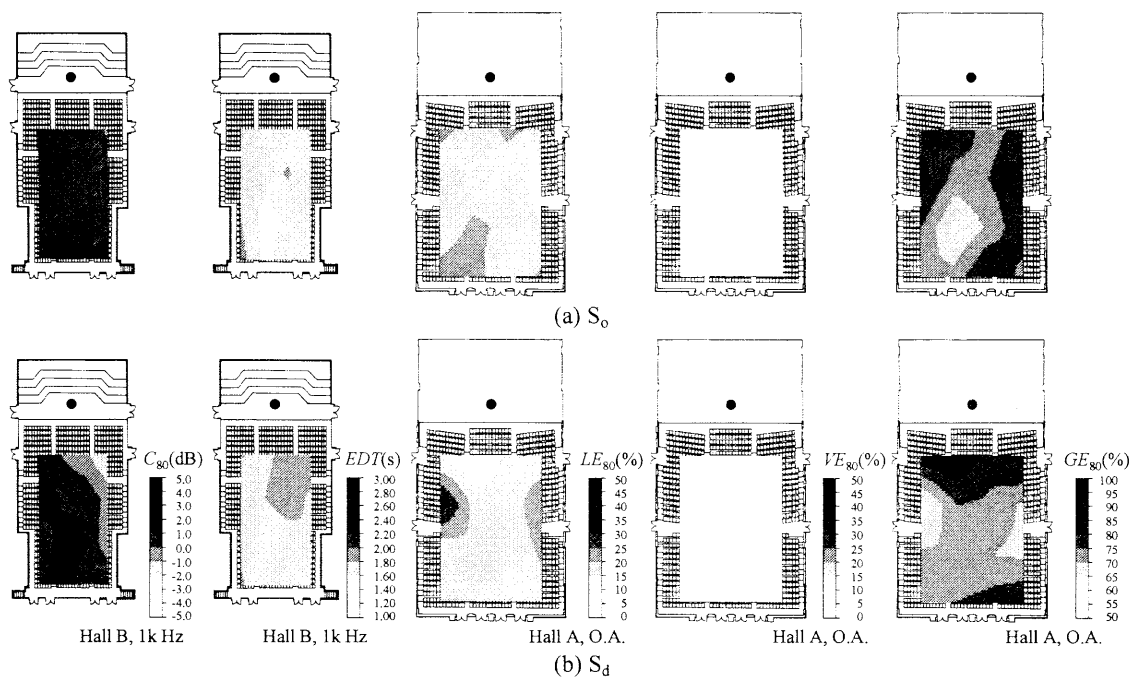


Fig.5 Spatial distribution of acoustical indices : (a), omni-directional source  $S_o$  ; (b), directional source  $S_d$ .

無指向性音源が 20.2%であるのに対して指向性音源は 30.6%とかなりばらつきが大きい。

以上の結果は、音源の指向性がホール音場の基本的特性に大きな影響を与えることを示している。例えば、無指向性音源で一様な空間分布が確保されている場合でも、指向性音源の場合にはそのようにならない可能性があることを示唆している。したがって、一様な音場の確保という観点からも音源の指向性を考慮することが重要であるといえる。

#### 4.3 考察

以上の結果をより詳細に検討するために、無指向性音源を用いて測定された室内音響物理量と指向性音源を用いて測定された室内音響物理量との平均残差  $RMS$  値を算出し、それを客席空間のエリア別にみてみた。なお、 $EDT$  に関する  $RMS$  値は、無指向性音源の場合の客席内平均値(エリア別にみる場合には各エリアの平均値)に対する百分率(%)で表す。

ここで、指向性音源の影響の有意性を評価するための基準として、室内音響物理量の弁別限  $DL$  (Difference Limen,  $C_{80}$ :0.67dB<sup>4)</sup>,  $EDT$ :4.0%<sup>5)</sup>,  $LE_{80}$ :5.0%)を用いる。また、Hall A, B, C, F については、コンサートホールに対する推奨許容範囲( $C_{80}$ :-2~+2dB,  $EDT$ :1.8~2.6s<sup>6)</sup>,  $LE_{80}$ :15%以上)を満足する観測点数の総観測点数に対する割合  $p$  値を導入した。

##### 4.3.1 時間エネルギー特性

$C_{80}$  についてみる。客席エリア別の  $RMS$  値を Table 2 に示す。各ホールの  $RMS$  値は、0.83~1.13dB であり、いずれのホールにおいても弁別限以上の差となっている。またエリア別にみても、Hall F の 2 階席を除いて弁別限以上の値となっており、音源の指向性が観測点における  $C_{80}$  に有

意な差を生じさせていることが分かる。各観測点における両音源の差の最大値は、Hall A : 3.0dB(2 階席), Hall B : 2.8dB(3 階席), Hall C : 1.8dB(2 階席), Hall D : 2.6dB(2 階席), Hall E : 2.8dB(後方席), Hall F : 1.5dB(1 階席)であり、ホールによって傾向が異なる。

次に、許容範囲を満足する観測点数の割合  $p$  値の結果を Table 3 に示す。Hall B, C, F において、無指向性音源の場合の  $p$  値に比べて指向性音源の  $p$  値が小さくなっているのが分かる。特に、Hall C では差は 18.7%と大きい。Hall A において両音源の  $p$  値に差がみられないのは、このホールはかなりライブな空間であり、ほとんどの観測点における  $C_{80}$  の値が許容範囲を外れているためである。

$EDT$  について、客席エリア別の  $RMS$  値と  $p$  値をそれぞれ Table 4, 5 に示す。各ホールの  $RMS$  値は 4.0~7.5% であり、いずれのホールにおいても弁別限以上の差である。エリア別にみても、Hall C の 3 階席を除いて、弁別限以上の差が認められる。 $p$  値についても、Hall C を除いて、8.3~16.7%の差が認められる。以上から、音源の指向性は観測点における  $EDT$  に有意な差を生じさせるといえる。

以上の結果は、音源の指向性は観測点の時間エネルギー

Table 2 Mean difference ( $RMS$ ) between  $C_{80}$  measured with omni-directional ( $S_o$ ) and directional ( $S_d$ ) sound source.  $DL$  is 0.67 dB for  $C_{80}$ .

Area	Hall					
	A	B	C	D	E	F
main floor	1.02	1.03	0.75	1.11	1.08	0.92
2nd floor	1.34	1.50	1.06	1.17	-	0.47
3rd floor	0.67	0.99	0.84	-	-	-
whole	1.04	1.11	0.87	1.13	1.08	0.83

(dB)

特性に有意な差をもたらし、その結果、音源の指向性の違いによって音場の評価が大きく変わることを示唆している。

#### 4.3.2 初期反射音の方向特性

$LE_{80}$ について、客席エリア別のRMS値と $p$ 値をそれぞれTable 6, 7に示す。ホール全体では、RMS値、エリア別のRMS値ともに、Hall Dを除いて弁別限以上の値(5.6~13.2%)となっている。 $p$ 値は、全ホールにおいて、指向性音源の方が無指向性音源よりも値は大きくなっている。これは、指向性音源の指向軸が側方を向いているため、観測点正面からの直接音成分が減少し初期反射音エネルギーの側方成分が増加するためであると考えられる。ホールによって傾向の違いはあるが、Hall Bでは両者の差は22%と顕著に大きく、音源の指向性が初期側方反射音に大きな影響を及ぼすことが確認できる。

$VE_{80}$ および $GE_{80}$ について、客席エリア別のRMS値をそれぞれTable 8, 9に示す。各ホールのRMS値は、 $VE_{80}$ では4.2~8.4%、 $GE_{80}$ では4.7~17.4%であり、ホールによって傾向は異なるが、大きな差となっている。ただし、これらの物理量は、現段階では音響設計指標として一般的に用いられている指標ではなく、また推奨される許容範囲も明らかでないため、ここではこれ以上の考察は行わない。

$LE_{80}$ ,  $VE_{80}$ ,  $GE_{80}$ の測定結果に関する上述のような傾向は、 $LE_{80}$ ,  $VE_{80}$ ,  $GE_{80}$ が反射音の方向情報に依存した物理

**Table 3** Percentage of the observation points within a permissible range for  $C_{80}$  (from -2.0 to 2.0 dB) in the total points in concert halls.

Source name	Hall			
	A	B	C	F
$S_o$	9.4	94.4	65.6	66.7
$S_d$	9.4	91.7	46.9	62.5
$ S_o - S_d $	0.0	2.7	18.7	4.2

(%)

**Table 4** Mean difference (RMS) between EDT measured with omni-directional ( $S_o$ ) and directional ( $S_d$ ) sound source. DL is 4.0 % for EDT.

Area	Hall					
	A	B	C	D	E	F
main floor	4.8	6.4	4.2	6.2	6.9	5.9
2nd floor	5.6	11.2	4.7	4.5	-	4.5
3rd floor	4.9	6.6	1.2	-	-	-
whole	5.0	7.5	4.0	5.7	6.9	5.6

(%)

**Table 5** Percentage of the observation points within a permissible range for EDT (from 1.8 to 2.6 s) in the total points in concert halls.

Source name	Hall			
	A	B	C	F
$S_o$	50.0	44.4	100.0	95.8
$S_d$	40.6	61.1	100.0	87.5
$ S_o - S_d $	9.4	16.7	0.0	8.3

(%)

量であることから、音源の指向性(指向軸の向き)の影響を直接的に受けやすく、したがってホールの空間形状に強く左右された結果であると考えられる。

以上より、音源の指向性は観測点の初期反射音の方向特性に有意な差をもたらすことが確認された。

#### 5. まとめ

既存のホール空間を対象に、音源の有する指向性が音場の物理特性に与える影響について検討した。まず、音源となる楽器の指向性を把握するために、無響室内でバイオリンとピオラの指向特性を測定した。そして、得られた指向特性を基に、音場測定用の指向性音源スピーカを開発した。次に、開発した指向性音源スピーカと従来から使用されている無指向性音源スピーカを用いて、既存の6つのホールを対象に音場測定を行い、両音源による室内音響

**Table 6** Mean difference (RMS) between  $LE_{80}$  measured with omni-directional ( $S_o$ ) and directional ( $S_d$ ) sound source.

Area	Hall					
	A	B	C	D	E	F
main floor	6.6	15.4	4.8	3.9	5.6	8.9
2nd floor	4.1	13.5	8.9	3.1	-	12.8
3rd floor	5.9	9.9	6.6	-	-	-
whole	5.9	13.2	6.6	3.6	5.6	10.0

(%)

**Table 7** Percentage of the observation points within a permissible range for  $LE_{80}$  (>15 %) in the total points in concert halls.

Source name	Hall			
	A	B	C	F
$S_o$	43.8	55.6	46.9	45.8
$S_d$	43.8	77.8	50.0	54.1
$ S_o - S_d $	0.0	22.2	3.1	8.3

(%)

**Table 8** Mean difference (RMS) between  $VE_{80}$  measured with omni-directional ( $S_o$ ) and directional ( $S_d$ ) sound source. DL is 5 % for  $VE_{80}$ <sup>7)</sup>.

Area	Hall					
	A	B	C	D	E	F
main floor	3.1	4.7	4.2	4.4	6.5	9.1
2nd floor	5.5	9.2	7.9	4.8	-	5.8
3rd floor	5.5	8.0	6.5	-	-	-
whole	4.2	7.0	6.0	4.6	6.5	8.4

(%)

**Table 9** Mean difference (RMS) between  $GE_{80}$  measured with omni-directional ( $S_o$ ) and directional ( $S_d$ ) sound source.

Area	Hall					
	A	B	C	D	E	F
main floor	7.8	18.9	6.4	4.9	9.9	12.5
2nd floor	6.3	18.6	13.7	4.5	-	14.0
3rd floor	8.2	14.9	8.3	-	-	-
whole	7.6	17.4	9.6	4.7	9.9	12.9

(%)

物理量の差異について検討した。その結果、指向性音源を用いて測定した時間情報に関する室内音響物理量  $C_{80}$ ,  $EDT$  の客席間の差は、無指向性音源の場合よりも大きな値となり、両音源間の  $RMS$  値は  $C_{80}$  で 0.83dB,  $EDT$  で 4.0% 以上であり、弁別限以上の有意な差が認められた。また、空間情報に関する室内音響物理量である  $LE_{80}$ ,  $VE_{80}$ ,  $GE_{80}$  についても、両音源間の  $RMS$  値は最大 13.2, 8.4, 17.4% もあり、音源の指向性の影響が顕著であった。さらに、指向性音源を用いて測定された  $LE_{80}$  の  $p$  値は、いずれのホールにおいても、指向軸の影響を受けて、無指向性音源の場合よりも大きくなることが確認された。

以上の結果は、従来から行われている無指向性音源による音場測定では、実際の演奏に対応した音場が必ずしも正しく把握できないことを示しており、演奏に対応した音場を把握するためには、測定用音源の指向性を考慮することが必要であると考えられる。

本論文の結果は、前報<sup>1)</sup>の幾何音響シミュレーションによる検討の結果とも符合するもので、ホールの性格や用途に応じた音場評価のためには、音源の指向性を考慮することが必要であることが再検証された。今後は、複数の音源を対象とした音場測定用指向性音源のモデル化や、実音

場における聴感との関連について検討していく必要があると考える。

#### 謝辞

本研究は平成 14 年度科学研究費補助金特別研究員奨励費(松尾昌美)によるものである。

#### 参考文献

- 1) 松尾昌美, 古屋浩, 藤本一寿 : 音源の指向性が室内音場評価に与える影響—幾何音響シミュレーションによる検討—, 都市・建築学研究(九州大学大学院人間環境学研究院紀要), 第 2 号, pp.109-117, 2002.
- 2) H.F.Olson : 音楽工学, 誠文堂新光社, 1969. など
- 3) 松尾昌美, 古屋浩, 藤本一寿 : 音源の指向性を考慮した室内音場評価法, 日本音響学会建築音響研究会, AA99-10, pp.1-8, 1999.
- 4) T.J.Cox, W.J.Davies and Y.W.Lam : The Sensitivity of Listener to Early Sound Field Changes in Auditoria, ACUSTICA, Vol.79, pp.27-41, 1993.
- 5) L.Cremer and H.A.Muller : Principles and Applications of Room Acoustics, Applied Science, 1982.
- 6) V.L.Jordan : Acoustical Design of Concert Halls and Theaters, Applied Science Pub., 1980.
- 7) H.Furuya and K.Fujimoto : Difference limen of ratio of vertical component to total early reflection energy on auditory envelopment, J.Acoust.Soc.Jpn.(E), Vol.18, No.4, pp.197-199, 1997.

(受理 : 平成 14 年 11 月 28 日)