九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

音源の指向性が室内音場評価に与える影響 : 幾何音響シュミレーションによる検討

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/10.15017/19020

出版情報：都市・建築学研究. 2, pp.109-117, 2002-07-15. 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：

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，2002年7月
J. of Architecture and Urban Design, Kyushu University, No.2, PP.109～117, July 2002

音源の指向性が室内音場評価に与える影響
—幾何音響シュミレーションによる検討—

A Study on Effect of Directional Characteristics of Sound Source on Evaluation of Sound Fields by Means of Geometrical Acoustic Simulation

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 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 which are ordinarily estimated with omni-directional source in design process. Impulse responses are calculated in simple models of room shape and real hall models by means of computer simulation based on geometrical acoustics when the directional distribution of sound source is varied. The relation between the directionality, the location of sound source and acoustical quantities, which are obtained from impulse responses, is examined. The result shows that there is a significant difference between the acoustic quantities obtained by using omni-directional sound source and directional ones, and it suggests that fundamental characteristics of sound source are very important factors in the acoustic evaluation of concert auditoria.

Keywords *: Directional characteristics of sound source, Acoustical parameters, Geometrical acoustic simulation, Acoustic design*
音源の指向性，室内音響指標，幾何音響シミュレーション，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”というような個性的な特徴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付く”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．

しなしながら，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されてきた音源の特性に，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．

1.3 本論文の目的

研究の第一段階として，本論文は，幾何音響をベースにしたコンピュータシミュレーション手法を用いて，音源の特性の違いが音場の物理特性に与える影響について検討し，音源の特性を考慮す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示すことを目的とする．

すなわち，音源の特性を，指向性の鋭さ，指向軸の向き，舞台上の位置の 3 つの要素でモデル化し，モデル化された単一指向性音源と従来から用いられている無指向性音源とで，室内音響物理量にどのような差異が生じるかを検討し，音源の特性を考慮す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示す．

* 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

2. 幾何音響シミュレーション

2.1 解析方法

音線法と虚像法をハイブリッドした Cone Beam Method[1)] (放射音線本数:52,502 本, 音線の追跡打ち切り時間: 400ms, 反射次数:9 次)を用いてホール内の観測点におけるインパルス応答を求め, 得られたインパルス応答から, 時間情報に関する音響指標 C_{80}, EDT, 空間情報を評価する指標として, (1)式に定義する LE_{80}, VE_{80}, GE_{80}(初期反射音の全エネルギに対する横方向, 鉛直方向, 前後方向成分の割合)を算出した. ここで, $p(t)$は音圧, α, β はそれぞれ反射音到来方向の仰角(°)と水平角(°)を表す.

$$
\begin{aligned}
LE_{80} &= \int_0^{80} \left(p(t)\cos\alpha\sin\beta\right)^2 dt \Big/ \int_0^{80} p^2(t)dt \\
VE_{80} &= \int_0^{80} \left(p(t)\sin\alpha\right)^2 dt \Big/ \int_0^{80} p^2(t)dt \qquad (1) \\
GE_{80} &= \int_0^{80} \left(p(t)\cos\alpha\cos\beta\right)^2 dt \Big/ \int_0^{80} p^2(t)dt \\
&\left(-\frac{\pi}{2} \le \alpha \le \frac{\pi}{2},\ -\pi \le \beta \le \pi\right)
\end{aligned}
$$

2.2 音源モデル

音源は, (i)指向性の鋭さ, (ii)指向軸の向き, および(iii)舞台上の位置の 3 つの要素が基本的性質であると考え, 単一指向性音源としてモデル化した.

指向性の鋭さは, **Fig.1** に示すように, 音の強さが最大値より 3dB 低下する指向軸からの角度 θ_{3dB}(°)で定義し, θ_{3dB} を 10～90°の範囲で 4 段階(S_1～S_4)に設定した. 指向軸の向きは, **Fig.2** に示すように, 最大値を示す方向の水平角 φ(°)と仰角 δ(°)で定義し, 舞台から客席方向を見て前,後,左,右,上,下の 6 方向(S_{Front}, S_{Back}, S_{Left}, S_{Right}, S_{Up}, S_{Down})に設定した. また, 音源の位置は, **Fig.3** に示す舞台中央(L0)と室内楽の楽器位置を想定した 4 点(L1～L4)に設定した.

それぞれの音源モデルの条件を **Table 1**～**Table 3** に示す. これら 13 種類の指向性音源(S_3 と S_{Front} は同一モデル)を無指向性音源 S_0 と比較することにより, 音源の指向性の鋭さ, 指向軸の向きおよび音源の位置がホール音場に及ぼす影響について検討した.

3. 単純な形状のホールを対象にした検討

3.1 対象ホール

初めに, 単純な平面形状のホールを用いて検討した. すなわち, 収容人員 1,500 人規模のオーディトリウムを想定して, 床面積と天井の高さ(18m)が同じで, 平面形状が, 横幅の広いモデル(Type 1)からシューボックス型と呼ばれる縦長のモデル(Type 4)までの計 6 種類のホールを対象にした. 観測点は, ホール内全域に 2m×2m の格子

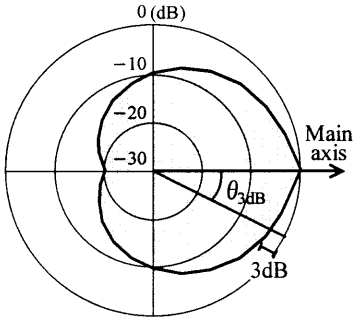

Fig.1 Directivity pattern of unidirectional sound source.

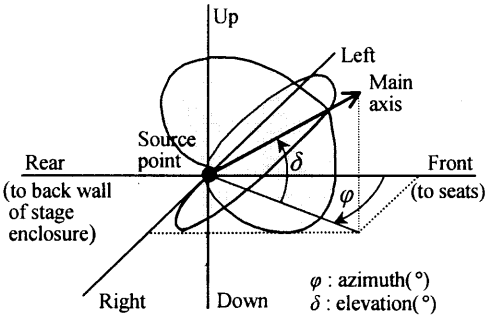

Fig.2 Definition of orientation of main axis in the directivity pattern of sound source.

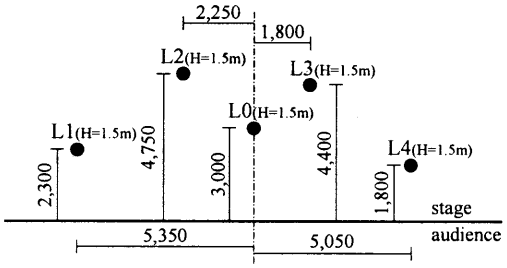

Fig.3 Location of sound sources on stage.

Table 1 Conditions of sound sources regarding the directivity pattern.

Source name	Location	θ_{3dB}*(°)	φ (°)	δ (°)
S_0	L0	omni-directional		
S_1	L0	90.0	0.0	0.0
S_2	L0	40.0	0.0	0.0
S_3	L0	25.0	0.0	0.0
S_4	L0	10.0	0.0	0.0

*angle referenced to main axis for which the sound intensity is 3dB lower than the maximum intensity.

Table 2 Conditions of sound sources regarding the orientation of main axis.

Source name	Location	θ_{3dB}(°)	φ (°)	δ (°)
S_{Front}	L0	25.0	0.0	0.0
S_{Back}	L0	25.0	180.0	0.0
S_{Left}	L0	25.0	90.0	0.0
S_{Right}	L0	25.0	−90.0	0.0
S_{Up}	L0	25.0	0.0	90.0
S_{Down}	L0	25.0	0.0	−90.0

Table 3 Conditions of sound sources regarding the location on stage.

Source name	Location	θ_{3dB}(°)	φ (°)	δ (°)
S_{L1}	L1	25.0	0.0	0.0
S_{L2}	L2	25.0	0.0	0.0
S_{L3}	L3	25.0	0.0	0.0
S_{L4}	L4	25.0	0.0	0.0

Table 4 Outline of simple models of room shape.

Type	V(m³)	S_0(m²)*1	V/S(m)	RT_{60}(s)*2	$\bar{\alpha}$ *2	N*3
1			3.8	2.38	0.22	152 (207)
2			3.7	2.27	0.23	165 (220)
3	16,000	900	3.9	2.38	0.23	158 (213)
4			3.8	2.37	0.22	153 (198)
5			3.8	2.49	0.21	158 (213)
6			3.7	2.37	0.22	157 (212)

*1 the floor area of audience
*2 averaged over the four octave bands from 250 to 2k Hz
*3 the number of observing points in the seating area (including those on stage)

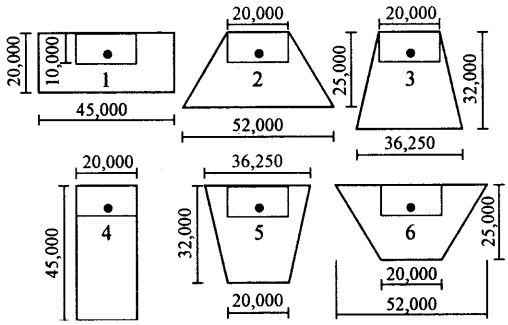

Fig.4 Plan of simple models.

状に 152～165 点を設けた．室の内装面は，客席床と客席後壁を吸音性，その他を全て反射性とした．対象ホールの音響諸元と平面形状を **Table 4** と **Fig.4** に示す．

3.2 解析結果

指向性の鋭さの変化による音場への影響をみるために，無指向性音源(S_0)を用いた場合と θ_{3dB} を変化させた 4 種類の単一指向性音源(S_1～S_4：指向軸の向きは客席方向正面(φ=0°, δ=0°))を用いた場合を比較した．算出された音響指標の客席内分布の例を **Fig.5**(形状 Type 2, 4：1k Hz)に示す．

まず C_{80} についてみてみる．両形状ともに指向性が鋭くなるにつれて値の大きなエリアが増加している．すなわち，形状 Type 4 では場内平均値が S_0 で−1.2dB であるのに対して S_4 では 5.0dB であり 6dB 以上の差が認められる．また，S_0 の場合は場内分布はほぼ一様(標準偏差 σ=1.4(Type 2), 1.1dB(Type 4))であるが，指向性が鋭くなるにつれてばらつきが大きくなり，S_4 の場合に σ は 4.5dB(Type 2), 2.7dB(Type 4)と最も大きくなる．*EDT* についても同様であり，指向性が鋭くなるにつれて客席中央部において値の低下が生じ，客席間のばらつきが大きくなっている．すなわち σ は，S_0 の場合 0.15s(Type 2), 0.25s (Type 4)であるのに対して，S_4 の場合は 0.86s(Type 2), 0.44s(Type 4)であり，明らかな変化が認められる．これは，単一指向性音源の指向軸が客席方向を向いていることから，拡散音エネルギに対する直接音成分のエネルギの割合が増加したことに起因するものと考えられる．

初期反射音の方向情報についてみると，特に横方向成分のエネルギの割合を示す LE_{80} では，指向性が鋭くなるにつれて客席中央部の値の低下が顕著である．ただし，σ の変化の度合いは形状によって異なる．すなわち，形状 Type 2 では客席間のばらつきが 12%(S_0)～21%(S_4)と明らかに変化しているのに対して，形状 Type 4 では，S_0 で 5%，S_4 で 6%とほとんど差がない．

次に，指向軸の向きの変化の影響をみるために，無指向性音源(S_0)を用いた場合と指向性音源の指向軸の向きを前後左右上下にした場合(6 種類)を比較した．音響指標の客席内分布の例を **Fig.6**(形状 Type 4：1k Hz)に示す．

C_{80} についてみると，S_{Left}, S_{Right} の場合に値は低下し(平均値−3.4dB)，また客席間のばらつきも大きくなっている(σ=1.5dB)．これは，音源の指向軸が側方を向くことにより前方から到来する直接音成分のエネルギの割合が減少するためである．S_{Up}, S_{Down} の場合は S_0 との差は小さい．*EDT* については，S_{Front} の場合を除き，S_0(平均値 2.59s)よりも値が顕著に大きくなっている(平均値 2.73～3.09s)．LE_{80} については，S_{Front}, S_{Left}, S_{Back}, S_{Right} の場合に，S_0 による分布と様相が異なったものとなっている．逆に S_{Up}, S_{Down} の場合は，S_0 に比べて全体的低い値となっているものの，分布は類似している．これらのことは，LE_{80} が初期反射音の全方向エネルギに対する横方向成分のエネルギの割合であることから，水平面内における指向軸の変化の影響を大きく受けたためと考えられる．

さらに，舞台上の音源の位置の影響をみるために，舞台中央に無指向性音源(S_0)を設置した場合と設置位置を変えた 4 つの指向性音源を比較した．音響指標の客席内分布の例を **Fig.7**(形状 Type 4：1k Hz)に示す．

C_{80} についてみると，場内平均値は S_0：−1.23dB に対して 2.21～2.92dB といずれも大きく，客席間のばらつき(σ)も S_0：1.07dB に比べ 1.23～1.96dB と大きい．*EDT* についてみると，S_0 による分布とは非常に異なる．この場合の場内平均値は S_0：2.59s に対して S_{L1}, S_{L2}, S_{L3}, S_{L4}：1.90～2.06s, σ は S_0：0.25s, S_{L1}～S_{L4}：0.21～0.39s である．LE_{80} は場内平均値が S_0：23%に対して S_{L1}～S_{L4}：15～17%であり場内全体としての値は小さくなっている．σ は S_0：5%に対して，S_{L1}～S_{L4}：6～7%とほとんど変化はない．このような結果は，S_0 との比較において，指向軸が客席方向を向いていることにより前方向からの直接音成分のエネルギが増加したことに起因していると考えられる．また分布性状は，いずれの指標も音源位置に対応したパターンとなっている．

3.3 考察

以上の結果は，音源の基本的性質が室内音響指標に大きな影響を与えることを示している．そこで以下では，音源の指向性の鋭さ，指向軸の向き，および位置の影響をより明確にするために，無指向性音源を用いた場合の音響指標の値と指向性音源モデルを用いた場合の音響指標の値の差について考察する．尚，指向性音源の影響は

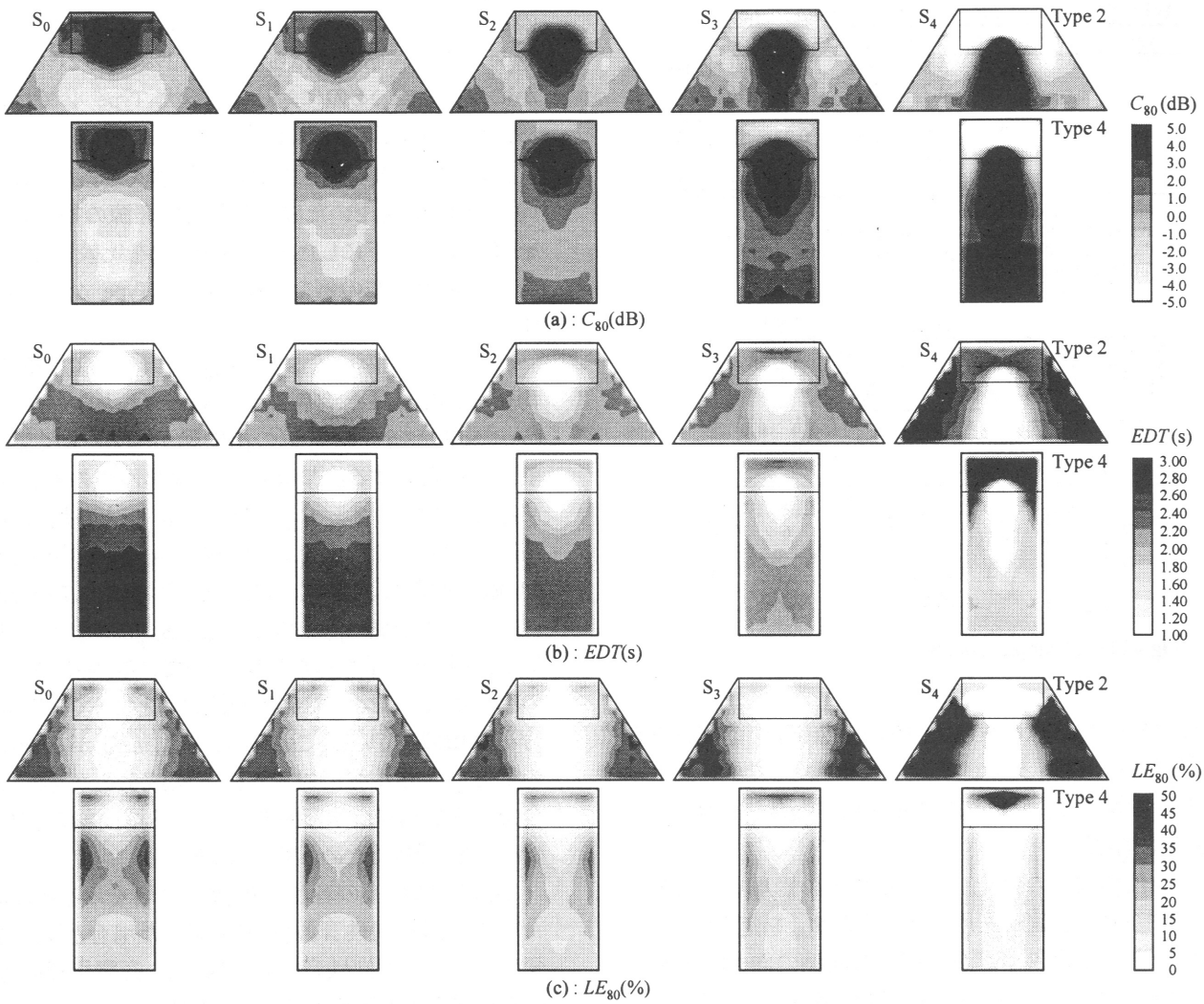

Fig.5 Spatial distribution of C_{80}, EDT and LE_{80} at 1k Hz in the simple models of Types 2 and 4 when the source directionality is varied; S_0, omni-directional source ; S_1, θ_{3dB}=90° ; S_2, θ_{3dB}=40° ; S_3, θ_{3dB}=25° ; S_4, θ_{3dB}=10°.

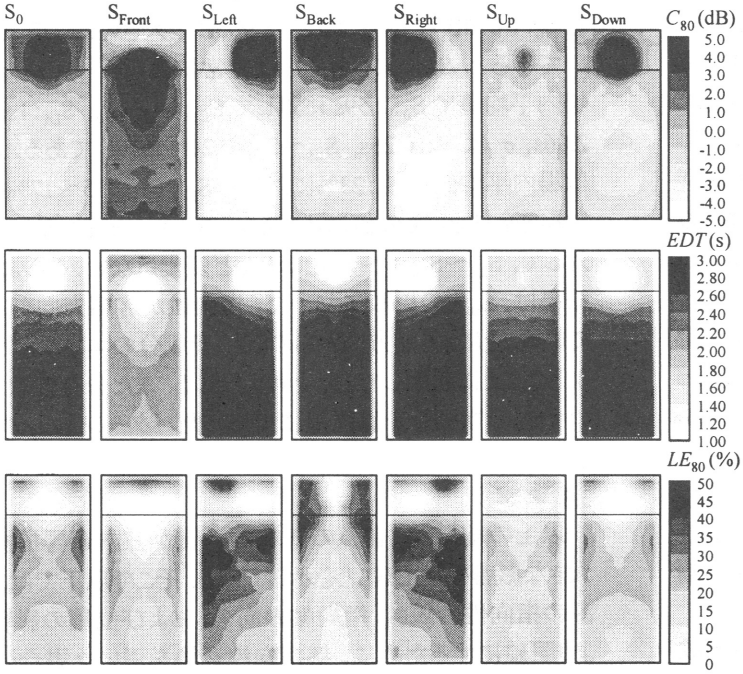

Fig.6 Spatial distribution of C_{80}, EDT and LE_{80} at 1k Hz in the simple model of Type 4 when the orientation of main axis is varied.

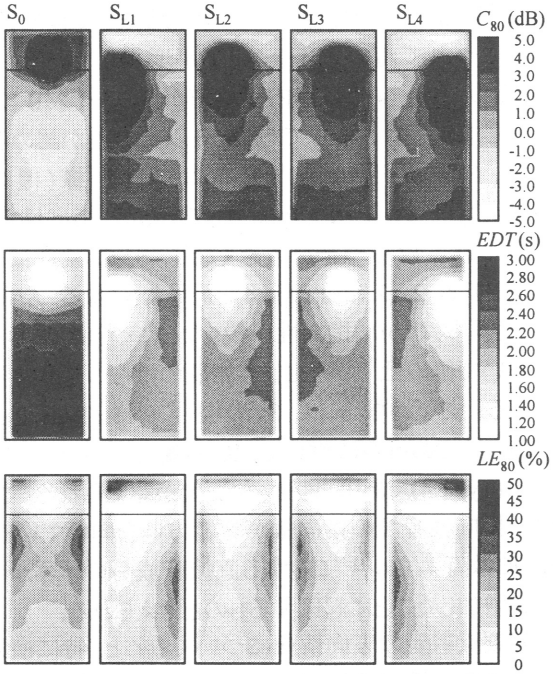

Fig.7 Spatial distribution of C_{80}, EDT and LE_{80} at 1k Hz in the simple model of Type 4 when the location of sound source is varied.

250～2k Hz のいずれの周波数帯域においても同様の傾向が確認されたので，以下では 250～2k Hz の平均値を用いて考察する．

3.3.1 指向性の鋭さによる影響

無指向性音源(S_0)を用いた場合と単一指向性音源(S_1～S_4)を用いた場合の音響指標の値を比較して**Fig.8**(Type 2, 4, S_2 は省略)に示す．図中には，両者の平均残差 *RMS*(S_0とS_1～S_4間の差の自乗平均)と相関係数 *r* を併せて示す．

3.2 で述べたように，いずれの指標も，S_0 との差は指向性が鋭くなる程大きくなっていることが分かる．

まず C_{80} についてみる(**Fig.8(a)**)．指向性が鋭くなるにつれて，横幅の広い形状 Type 2 では，値が大小両方に変化しているのに対し，縦長形状の Type 4 では，S_0 の場合より大きい値へ変化している．このことは，Type 4 が音源の指向軸と同じ向きに縦長であるために，直接音エネルギの増加するエリアが幅広型の平面形に比べて相対的に広くなるためであると考えられる．また，両音源間の相関をみると，指向性が鋭くなるにつれて *r* は明らかに低くなっている．すなわち S_1 の場合 0.90, 0.97 と相関は非常に高いのに対し，S_4 では−0.29, 0.10 とほとんど相関はない．

EDT については(**Fig.8(b)**)，Type 4 では値は小さい値へ変化している．これは C_{80} と逆の傾向であり，一般に C_{80} と *EDT* が負の相関関係にあることと符合する．*r* は，S_1 の場合 0.87, 0.98 であるのに対して，S_4 の場合−0.06, 0.22

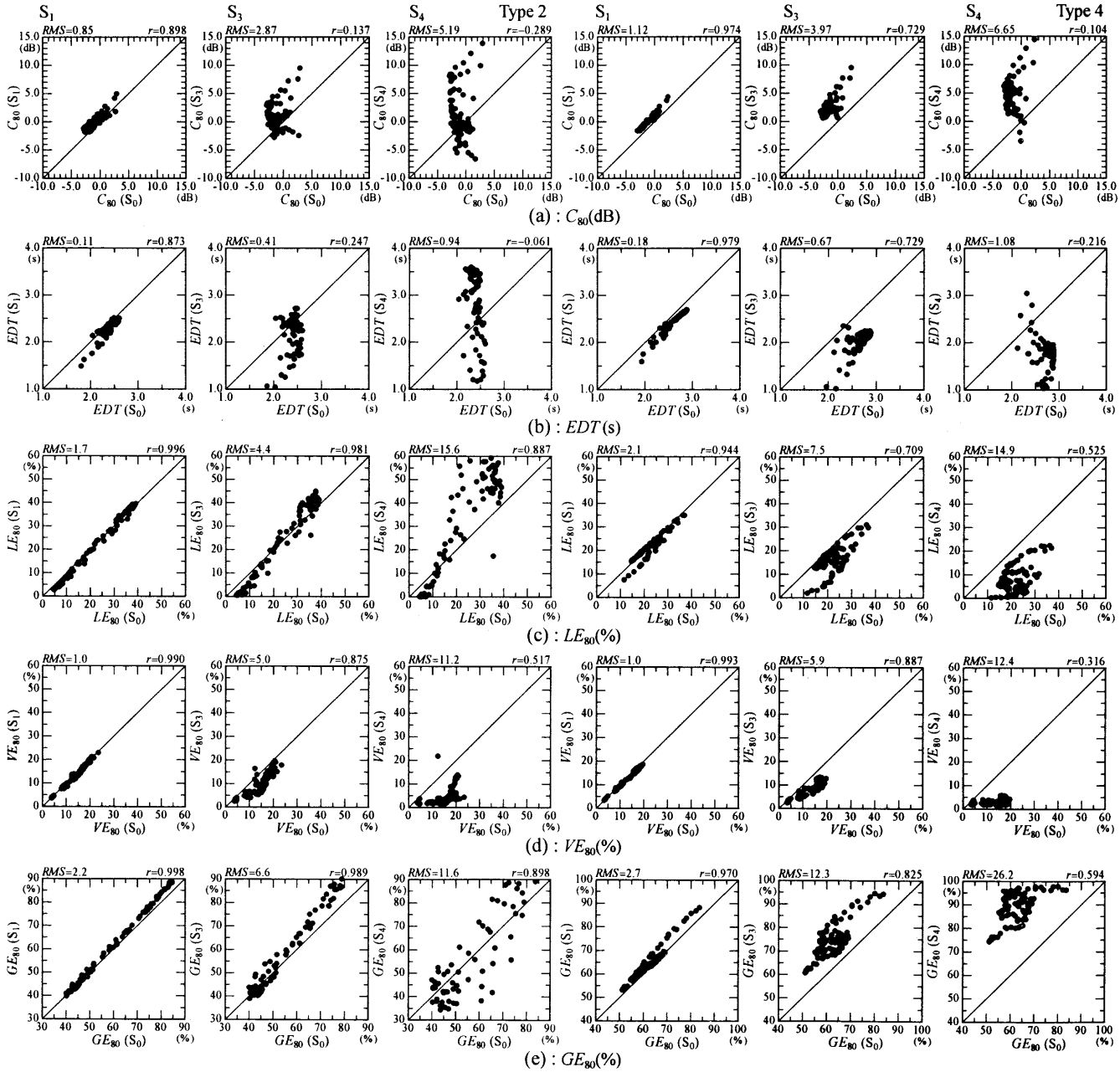

Fig. 8 Comparison between acoustical indices calculated with directional source (S_1, S_3, and S_4) and those with omni-directional one (S_0): *r*, cross correlation coefficient.

であり，指向性が鋭くなるにつれて影響が大きくなっていることが分かる．

次に，方向情報に関する指標をみる．Type 4 では，指向性が鋭くなるにつれて LE_{80} は S_0 より小さい値へ，GE_{80} は大きい値へ変化しているのが分かる．これは指向軸の向きが客席側から見て前方向となることから，前後方向エネルギが増加し，逆に側方エネルギが減少するためであると考えられる．一方，Type 2 では，LE_{80}, GE_{80} ともに Type 4 に比べて S_0 との相関度は高いものの，Type 4 と同様に指向性が鋭くなるにつれて差は大きくなっている．また，場内のばらつきは，3.2 に述べたように，Type 2 に比べて Type 4 の方が明らかに小さい．これらのことは，縦長の平面形では，客席を向いている音源の指向性の影響が強く現れる反面，指向性の鋭さに依らず常に一様な空間分布が確保されやすいことを示すものである．

さらに，各指標の平均残差 *RMS* を弁別限 *DL* (Difference Limen：図中の点線)とともに **Fig.9** に示す．尚，各指標の弁別限は，C_{80}：0.67dB[2]，*EDT*：4.0%[3]，LE_{80}, VE_{80}, GE_{80}：5%[4]とした．ここで，*EDT* については，無指向性音源の場合の客席内平均値に対する百分率(%)で表している．

C_{80}, *EDT* については，指向性が鋭くなるにつれて *RMS* 値は明らかに増加しているのが分かる．また，いずれの場合も弁別限以上であり，指向性の鋭さの影響が聴感上も有意であることが分かる．S_0 との差の最大は，S_4 の場合に C_{80}：4.3～7.8dB，*EDT*：29～44%である．LE_{80}, VE_{80}, GE_{80} についても，同様に，指向性が鋭くなるにつれて *RMS* 値は増加しているのが分かる．特に，LE_{80} および GE_{80} については，θ_{3dB} が 25°以下で急激に *RMS* 値が大きくなっており，S_4 の場合で LE_{80}：11～31%，GE_{80}：12～26%と非常に大きい．

これらのことは，いずれの音響指標においても指向性の鋭さの影響が有意であることを示すものである．

3.3.2 指向軸の向きによる影響

S_0 と S_{Front}, S_{Left}, S_{Back}, S_{Right}, S_{Up}, S_{Down} を比較した時の各音響指標の *RMS* 値を **Fig.10** に示す．

C_{80} は，S_{Up}, S_{Down} の場合を除いて *RMS* 値は全て弁別限以上であり，聴感上有意な差である．ただし，指向軸の向きの影響はホール形状タイプによって異なる．すなわち，比較的横幅が広い形状(Type 1, 2, 5, 6)では S_{Left} と S_{Right} の場合に *RMS* 値は最大(5～6dB)であるのに対して，縦長形状(Type 3, 4)では S_{Front} の場合に *RMS* 値は最大(3～4dB)となっている．これは，横幅が広い形状においては，S_{Left}, S_{Right} が直接音成分のエネルギを増加させるエリ

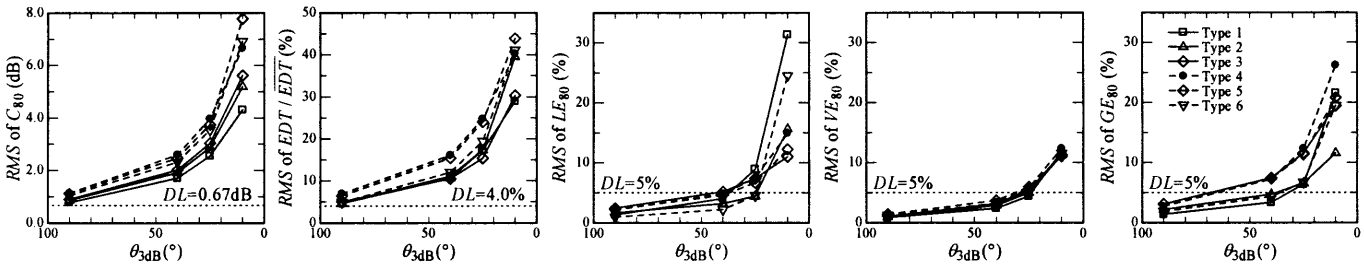

Fig.9 Difference between acoustical indices calculated by using various directionality of source and those with omni-directional source in the simple models.

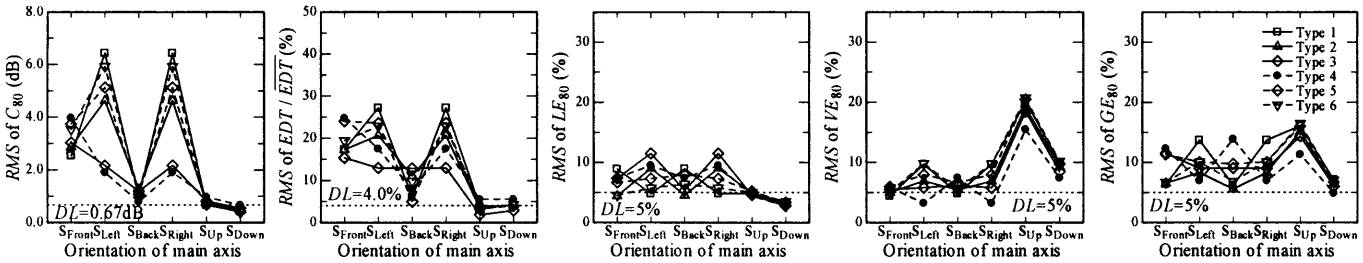

Fig.10 Difference between acoustical indices calculated by using various orientations of source and those with omni-directional source in the simple models.

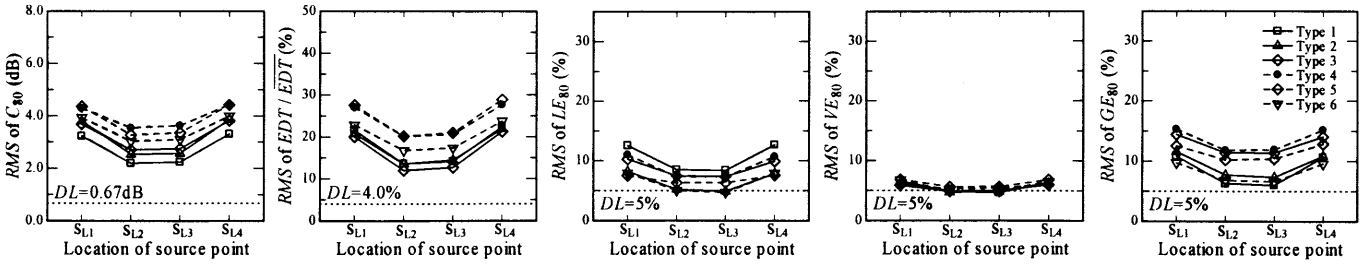

Fig.11 Difference between acoustical indices calculated by using various locations of source and those with omni-directional source in the simple models.

アが広くなるためであり，また縦長形状では，S_{Front} の場合に直接音成分が最も大きくなるためであると考えられる．*EDT* についても同様の傾向である．次に，方向情報についてみる．LE_{80} は，S_{Down} 以外の場合 *RMS* 値は弁別限以上であり，聴感上有意な差である．特に，Type 2, 3, 4 において，S_{Left}, S_{Right} の場合に最も顕著な差(9～12%)が認められる．VE_{80} は，概ね *RMS* 値は弁別限以上の値であり，聴感上有意な差であるといえる．また，VE_{80} は鉛直成分エネルギの割合であるため，予想されるように S_{Up} の場合に最大となっている．GE_{80} についても，全ての場合に弁別限以上であり，S_{Up} の場合に *RMS* 値は最大となっている(11～16%)．また，S_{Front}, S_{Left}, S_{Right}, S_{Back} においては前述した LE_{80} と逆の傾向を示している．

3.3.3 位置による影響

S_0 を用いた場合と S_{L1}, S_{L2}, S_{L3}, S_{L4} を用いた場合の各音響指標の *RMS* 値を **Fig.11** に示す．音源の位置に関しては，S_0 と S_{L1}～S_{L4} 間の *RMS* 値はいずれの指標においても弁別限以上で，聴感上有意な差である．また，S_{L1}～S_{L4} 間の *RMS* 値の差も，C_{80} で 0.89～1.33dB, *EDT* で 7～9% と弁別限以上で有意な差である．ただし，方向情報については，VE_{80} で 1～2%, LE_{80}, GE_{80} で 1～4%, 3～5%と弁別限以下であり，音源の位置による影響はあまり受けていない．

3.4 まとめ

単純な形状のホールを対象として，無指向性音源の場合と指向性音源の場合の音場特性の差について検討した．その結果，指向性の鋭さに関しては，いずれの音響指標も θ_{3dB} が小さくなるにつれて増大すること，そして θ_{3dB} が 25°～40°以下ではいずれの音響指標でも聴感上有意な差が認められることが分かった．指向軸の向きに関しては，形状タイプにより違いはあるものの，S_{Up}, S_{Down} の場合の C_{80}, *EDT*, LE_{80} を除いてほとんどの場合に聴感上有意な差が生じた．音源の位置の違いに関しては，C_{80}, *EDT* において大きな差が生じた．

以上のことから，室内音場の評価において，音源の指向性，指向性の向き，音源の位置の影響を考慮することが重要であることが示された．

4. 既存のホールを対象にした検討

単純形状モデルにおいて得られた音源特性の音場への影響が，構成面数の多い複雑な形状を有するモデルにおいても同様に現れるかどうかを検討するため，既存のホールを対象として，同様の解析を行った．

4.1 対象ホール

1,500～1,800 席規模の既存の 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)を対象にした．観測点は各ホール 24～36 点である．室内表面の吸音仕様は，実際のホールの内装および残響時間をもとに設定した．形状モデルと音響諸元を **Fig.12** と **Table 5** に示す．

4.2 解析結果

単純形状の場合と同様に，音源の指向性が鋭くなるにつれて場内全域にわたって C_{80} は増加し，*EDT* は減少する．例えば，Hall A の場合，C_{80} の場内平均値は S_0 で −2.6dB であるのに対して S_4 では 2.3dB となり，4.9dB も大きくなる．*EDT* は，S_0 で 3.27s, S4 で 2.21s となり，1.06s 短くなっている．このような傾向は，他のホールでも同様であ

Table 5 Outline of real auditorium models.

Hall	Seats	V(m³)	V/S(m)	RT_{60}(s)*1	$\bar{\alpha}$*1	N*2	M*3
A	1,871	20,297	2.9	2.22	0.18	32	3,164
B	1,818	19,088	2.9	1.77	0.23	36	2,563
C	1,813	21,279	3.1	2.10	0.20	32	629
D	1,522	11,968	2.5	1.58	0.22	36	406
E	1,780	12,742	3.0	1.48	0.27	24	106
F	1,811	20,794	3.1	2.24	0.19	24	672

*1 averaged over the four octave bands from 250 to 2k Hz
*2 the number of observing points in the seating area
*3 the number of surfaces of hall model

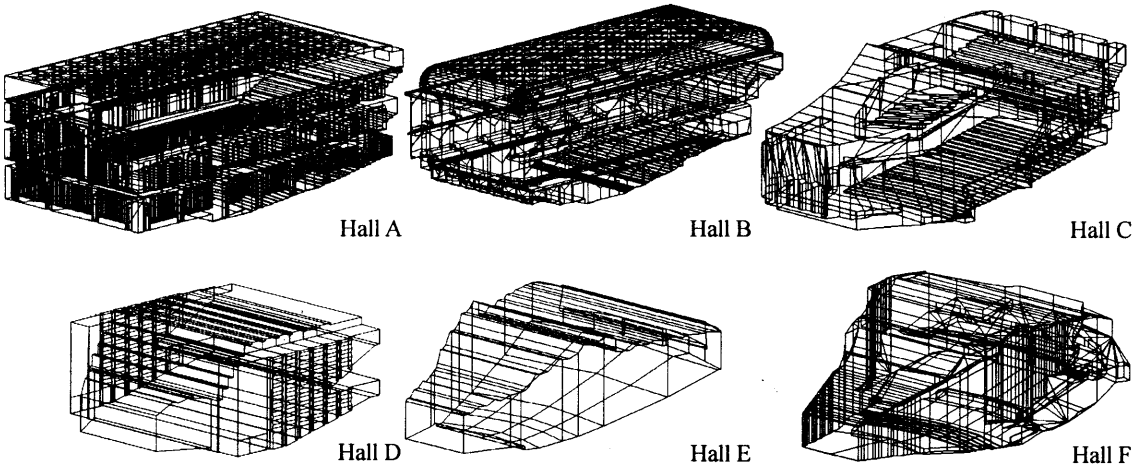

Fig.12 Real auditorium models.

り，単純形状の縦長モデル(Type 4)の結果と類似している．また，場内のばらつきは，Hall A の場合，C_{80} が S_0: 1.4dB, S_3:1.3dB, S_4:3.28dB, *EDT* が S_0:0.72s, S_3:0.38s, S_4:0.84s であり，S_4 で急激に増加している．LE_{80}, VE_{80} は，指向性が鋭くなるにつれて小さくなり(S_0:21%, 16%, S_4: 9%, 11%)，単純形状の傾向と同様である．GE_{80} は，指向性が鋭くなるにつれて値は S_0:63%から S_4:80%へと増加し，Type 3, 4, 5 と同様の傾向である(値は Hall A の場合を示す)．

4.3 考察

無指向性音源(S_0)の場合との差について考察する．ここで，250～2k Hz のいずれの周波数帯域においても同様の傾向が確認されたので，以下では周波数平均値を用いる．S_0 と各音源モデル間の平均残差 *RMS* 値を各音響指標の弁別限(*DL*:図中の点線)とともに **Fig.13** に示す．

4.3.1 指向性の鋭さによる影響

Fig.13(a)より，単純形状の場合と同様に，いずれの指標においても，*RMS* 値は指向性が鋭くなるにつれて増加していることが分かる．まず，C_{80}, *EDT* についてみる．Hall D の S_1 を除いて，*RMS* 値は弁別限以上であり，聴感上有意な差である．*RMS* 値の最大は C_{80} で 6.91dB, *EDT* は Hall E で 68%である．LE_{80} は，S_4 の場合で 7～13%, VE_{80} は Hall B を除き S_4 の場合に 5%以上あり，弁別限以上である．GE_{80} は，S_1 以外で概ね弁別限以上である．いずれの指標においても，単純形状を対象にした場合と同様の傾向を示しており，指向性の鋭さの影響が認められる．

4.3.2 指向軸の向きによる影響

Fig.13(b)より，C_{80}, *EDT* は，いずれの指向軸の向きにおいても *RMS* 値は弁別限を超えており，有意な差であることが分かる．LE_{80} は，水平面内における指向軸の向きの変化の影響を強く受けるため，単純形状の場合と同様に S_{Up}, S_{Down} 以外では弁別限以上の差が生じている．また，VE_{80}, GE_{80} についても，*RMS* 値は概ね 5%以上と有意である．ただし，方向情報を表すこれらの指標は，指向軸の向きの違いによる影響が，単純形状に比べて全体的に小さい．これは，実際のホールでは，壁面や天井面の凹凸があり，その拡散効果のために音源の指向軸の影響が緩和されたものと考えられる．

4.3.3 位置による影響

Fig.13(c)より，音源の位置に関しては，VE_{80} の場合を除き，S_0 と S_{L1}～S_{L4} 間の差は，弁別限以上で有意な差が生じており，これは単純形状の場合と同様である．ただし，VE_{80} でも Hall B, E において弁別限以上の *RMS* 値があり，有意な差がある．また，*EDT* は形状モデルの違いによる差が大きい．

さらに，S_{L1}～S_{L4} 間の *RMS* 値の差は，Hall B ではいずれの指標においても弁別限以上(C_{80}: 1.14dB, *EDT*: 8%, LE_{80}:5%, VE_{80}:7%, GE_{80}:6%)であり音源位置の影響を受

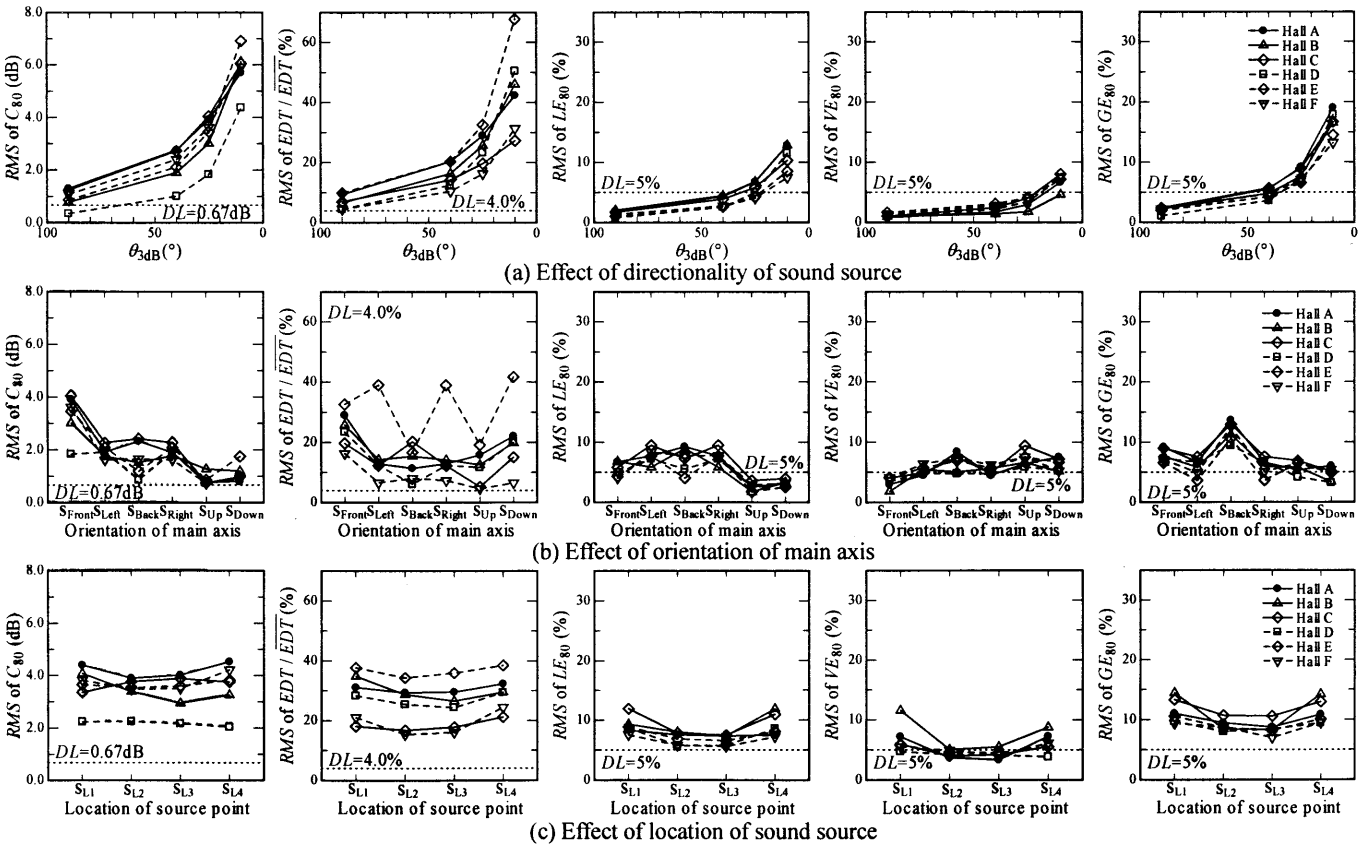

Fig.13 Difference between acoustical indices calculated with directional sources and those with omni-directional source in the auditorium models.

けているが，Hall A はいずれの指標においても弁別限以下(C_{80}:0.63dB, EDT:3%, LE_{80}:1%, VE_{80}:4%, GE_{80}:2%)であり，音源位置の影響は認められない．すなわち，位置による影響は形状モデルにより傾向が異なる．

5. まとめ

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指標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た．

音源の指向性の鋭さの影響は，いずれの音響指標においても，指向性が鋭くなるにつれて増大すること，C_{80}, EDT は θ_{3dB} が 40°以下，LE_{80}, VE_{80}, GE_{80} は θ_{3dB} が 10～25°以下において弁別限以上の有意な差が認められることが分かった．これは，単純な形状モデルおよび既存ホールのモデルにおいて同様の傾向であった．

指向軸の向きの影響は，ホール形状で傾向が異なるものの，概ね弁別限以上の有意な差があった．特に，方向情報に関する指標である LE_{80} は水平面内における指向軸の向きの変化の影響を強く受け，最大 12%の差が確認できた．

音源の位置の影響は，無指向性音源と比較した場合には，いずれの音響指標においても概ね有意な差が生じるが，指向性音源間で比較した場合は，形状によって傾向が異なり，影響を受ける場合と受けない場合があることが分かった．

以上の結果は，現在行われている無指向性音源による音場評価では，実際の演奏に対応した音場の把握が難しいことを示唆しており，音源の指向性を考慮した評価法が重要であることを示している．特に，弦楽器のように比較的指向性の鋭い音源を対象にする場合は，音源の特性を配慮した検討が必要であると考えられ，その結果如何が音響設計における最適形状の決定を左右する可能性のあることを示唆している．

今後は，具体的な楽器を想定した音源モデルによる検討を行うとともに，音源の指向性の影響について実際のホール音場を対象に検討していきたい．さらに，実測に対応できる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も検討していく必要があると考える．

謝辞

本研究は平成 13 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．また本研究の一部には財団法人大林都市研究振興財団の助成を受けた．ここに記して感謝します．

参考文献

1) E.De Geest and C.F.McCulloch : Numerical Modeling in Geometrical Acoustics using the Conical Beam Method with Applications in Architecture, Industry and the Environment, Proc. of EURO-NOISE 92, Vol.3, 1992.
2) 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.
3) L.Cremer and H.A.Muller : Principles and Applications of Room Acoustics, Applied Science, 1982.
4) 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 5 月 31 日)