

# コンサートホールにおける後期音の方向成分と 音に含まれた感じの関係

山下 勝広

## 1. 序論

### 1.1 はじめに

「音響的に優れたコンサートホールにする」ためにコンサートホールの音響設計に携わる者たちは現在に至るまで専心して来た。「音響的に優れた」という音響評価は、人が音を聴いて良いと感じるという主観的な評価であり、それは心理量である。しかし、室の大きさや形状、壁面材料などの建築的諸条件から音場予測によって得られるのは音の物理的な特性である。よって、「音響的に優れたコンサートホール」を設計していくためには、心理量と音の物理的な特性との関係を明らかにしていくことが必要なのである<sup>1)</sup>。

コンサートホールの響きは、残響感や持続感などの時間的属性、方向感や空間印象などの空間的属性、そして音の大きさ感や音色などの質的属性といった三つの属性に大きく分けることができる<sup>2)</sup>。このうち空間的属性である「空間印象」は、コンサートホールの音響評価に影響を与える重要な心理的要因の一つである。そして「空間印象」に関して、1960年代後半から、初期反射音の到来方向、特に側方からの初期反射音と深く関係していることが明らかにされてきた<sup>3)4)5)</sup>。

「空間印象」には少なくとも「見かけの音源の幅」(Apparent Source Width: ASW)と「音に含まれた感じ」(Listener Envelopment: LEV)の二つの要素があることが明らかにされている<sup>6)</sup>。さらに、側方からの初期反射音はASWに寄与していることが明らかになり<sup>4)</sup>、ASWに関する多くの研究がなされてきた。また、空間印象のもう一つの要素であるLEVに関しては、直接音からの遅れ時間の大きい後期音に関係していることが指摘され始め<sup>7)</sup>、研究も徐々に増え始めてきた。

そのような中で、Bradleyら<sup>8)</sup>や、森本ら<sup>9)</sup>、そして羽入ら<sup>10)</sup>による研究はあるが、いずれも音を2次元的にとらえたものであるため、実際のコンサートホールのような3次元音場において、これらの研究が適当であるかは明らかではない。ゆえに音を3次元的な広がりのあるものとしてとらえ、その上で研究を行っていく必要があると言える。

### 1.2 既往の研究

本研究室では数年前より、3次元音場を用いた一連の心理実験を行い、後期音の到来方向とLEVとの関係について研究を行ってきた。まず、側方、前方、上方、後方の4つの方向から到来する後期音のレベル変化がLEVに及ぼす影響を検討した。その結果、側方反射音だけでなく上方並びに後方から到来する後期音レベルもまたLEVと正の相関関係にあることを明らかにした。また、方向別後期音レベルのLEVに対する寄与の度合いは、側方、後方、上方、前方の順に大きいことを明らかにし、また前方の寄与の度合いは小さいことも明らかにされた<sup>11)</sup>。さらに、後期音エネルギーの到来方向分布とLEVとの関係を調べるために、初期音エネルギーに対する後期音エネルギーの割合 $C_{80}$ を一定として方向別後期音エネルギー率の変化がLEVへ与える影響を検討した。その結果、側方後期音エネルギー率の寄与が最も大きいこと、また $C_{80}$ が大きい場合には後方及び上方後期音エネルギー率の寄与は側方後期音エネルギー率の3~5割であることを明らかにした<sup>12)</sup>。

以上より、側方成分を持たない後方や上方から到来する後期音もまたLEVに寄与することを示すとともに、 $C_{80}$ を一定とした場合の方向別後期音エネルギー率のLEVへの寄与の度合いを明らかにした。

### 1.3 研究の目的

先に述べた既往の研究は、後期音の到来方向が前方、後方、側方、上方の4方向に限定された場合の結果である。したがって、4方向に限定されない様々な方向から後期音が到来する場合に、後期音エネルギーのLEVへの寄与がどのようになるかは明らかではない。よって、様々な方向から後期音が到来する場合について検討していく必要がある。そこで今回の研究では、前方、後方、側方、上方以外からも後期音を到来させ、前方、後方、側方、上方の4方向成分に後期音エネルギーを分解した上で、その4方向それぞれについての方向別後期音エネルギー率の変化がLEVへ与える影響を検討した。そしてこの検討を通して、後期音の到来方向が4方向に限定された場合と同様に方向別後期音エネルギー率のLEVへの寄与の度合いが、後方及び上方の寄与が側方

の3~5割であることを示し、そして最終的に到来する後期音の LEV への寄与の割合を4方向成分に分解された後期音エネルギーによって判断して良いかを明らかにすることが本研究の目的である。

## 2. 心理実験

### 2.1 実験方法

実験は無響室内において行った。半径1.5mの半球面上に配置されたスピーカ群から刺激対を提示し、頭を固定して座らせた被験者に一対比較法により音に含まれた感じの評価を求めた。そして、様々な方向から後期音が到来する場合に関して、後期音エネルギーを4方向成分(前方、後方、側方、上方)に分解し、側方、後方、上方の方向別後期音エネルギー率が  $C_{80} = -3\text{dB}, 0\text{dB}$  の2段階でそれぞれ LEV に与える寄与の割合について検討した。スピーカ配置を Fig.1 に示す。この時、スピーカ配置は、前方、後方、側方、上方の4方向成分に後期音エネルギーを分解する必要のある音を出力できるように配置した。

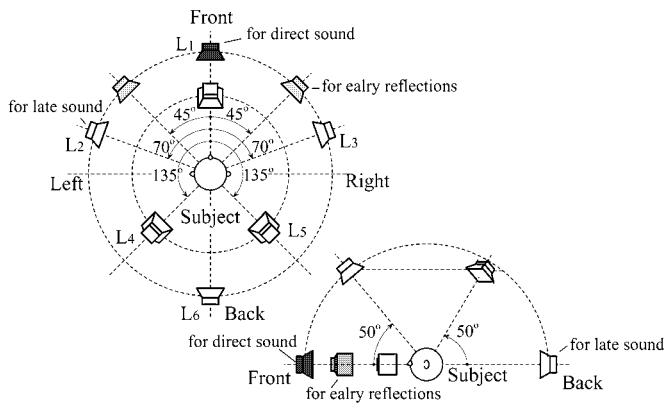


Fig.1 Arrangement of loudspeakers in an anechoic chamber.

### 2.2 刺激音場

刺激のインパルス応答は、直接音、6本の初期反射音 ( $t = 0 \sim 80\text{ms}$ ,  $LE=0.17$ ) 並びに6方向からの後期音 ( $t = 80 \sim \infty\text{ms}$ ) から成り、直接音並びに初期反射音は全刺激で一定である。また、残響時間は1.8秒である。刺激音場の構成を Fig.2 に示す。

後期音エネルギーの方向成分を規定する物理量として、側方後期音エネルギー率  $LE_{\text{late}}$  (late:  $t = 80 \sim \infty\text{ms}$ , 以下同様), 上方後期音エネルギー率  $VE_{\text{late}}$ , 後方後期音エネルギー率  $BE_{\text{late}}$  並びに前方後期音エネルギー率  $FE_{\text{late}}$

を定義した。これらは、全後期音エネルギーに対する各方向成分エネルギーの割合である。

刺激音場は、後期音の LEV への寄与の割合を4方向成分に分解された後期音エネルギーによって判断して良いかを明らかにするために、 $C_{80}$  並びに方向別後期音エネルギー率を、到来方向が4方向に限定された場合について行われた実験と同じ設定で行った。この刺激音場を Table 1 に示す。刺激の呈示音圧レベル (Binaural  $SPL^{13}$ ) は  $63\text{dB}$  で一定であり、全後期音レベルは一定で  $C_{80} = -3\text{dB}, 0\text{dB}$  の2段階である。

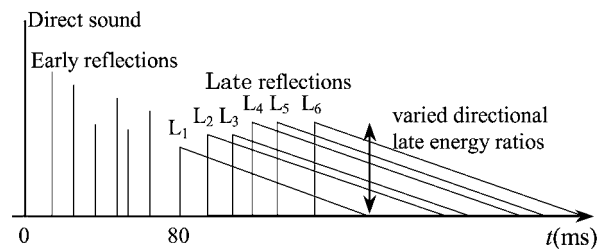


Fig.2 Signal configuration of the sound fields used in experiment.

Table 1 Values measured in seven soundfields in each experiment.

Stimulus No.	$BSPL$ (dB)	Directional late sound energy ratio			
		$LE_{\text{late}}$	$VE_{\text{late}}$	$BE_{\text{late}}$	$FE_{\text{late}}$
1	63	0.30	0.30	0.30	0.10
2		0.20	0.50	0.20	0.10
3		0.30	0.10	0.50	0.10
4		0.50	0.25	0.15	0.10
5		0.10	0.25	0.55	0.10
6		0.60	0.10	0.20	0.10
7		0.20	0.55	0.15	0.10

### 2.3 被験者

被験者は建築環境学を専攻している20~26歳の学生7名で、実験に先立ち、被験者には教示文及び概念図を用いて「音に含まれた感じ」の説明を行うとともに、数個の刺激による練習を行った。実験では7個の音場すべての組み合わせ(21対)を刺激対とし、各人に同一刺激対を8回ずつ判断させた。

## 3. 結果と考察

### 3.1 実験結果

今回の心理実験により、 $C_{80} = -3\text{dB}, 0\text{dB}$  のそれぞ

れで、56回分(=7名×8回分)のデータを得ることができた。被験者全員の相互間での判断の一致の度合いについて調べるために一致性の検定を行ったところ、有意水準5%で一致していた。

また実験から得た回答から、Thurstone Case Vに基づき、心理的距離尺度を構成した。得られた尺度に対してモデルの適合度の検定を行った結果、有意水準5%で事実に適合していた。距離尺度の算出結果をFig.3に示す。

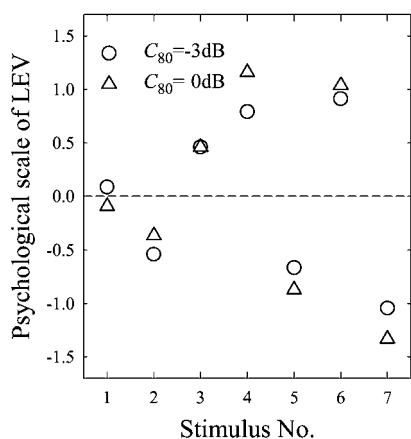


Fig.3 Psychological scale of LEV

### 3.2 考察

本実験の目的は、到来する後期音のLEVへの寄与の度合いを4方向成分(前方、後方、側方、上方)に分解された後期音エネルギーによって判断して良いかを明らかにすることである。これを明らかにするために、後期音エネルギーを4方向成分に分解した上での方向別後期音エネルギー率のLEVへの寄与の度合いに関して、後期音の到来方向が4方向に限定された場合と同様に後方及び上方後期音エネルギー率の寄与が側方後期音エネルギー率の3~5割であることを示す必要がある。そこで本実験の結果について、重回帰分析を行った。その結果をTable 2に示す。

Table 2 Standard regression coefficients for three directional late energy ratios.

C <sub>80</sub> (dB)	Multiple correlation coefficient	Standard regression coefficients		
		LE <sub>late</sub>	BE <sub>late</sub>	VE <sub>late</sub>
-3	0.980	1.558	0.783	0.433
0	0.910	1.686	1.012	0.739

Table 2から分かるように、方向別エネルギー率のLEVへ寄与の度合いは、側方が最大であり、上方については側方の3~4割であり、後方については側方の5~6割である。そしてこれは、後期音の到来方向が4方向に限定された場合についての結果と符合すると言える。

そしてさらに、後期音の到来方向が4方向に限定された場合について検討した時に導出された重回帰式を用いて、本実験の考察を行っていくことにする。この重回帰式に今回の実験で得られた物理測定値を代入し、そして今回のLEV尺度を予測計算した。そして予測計算して得られたLEVと実測で得られたLEVとの関係をFig.4, Fig.5に示す。

Fig.4, Fig.5から分かるように、重回帰式によって予測されたLEVと本年度の実測のLEVとの相関係数はC<sub>80</sub> = -3dBで0.946であり、C<sub>80</sub> = 0dBで0.929である。このことから、この重回帰式は、本年度の心理実験においても適用できると言える。

以上のことから、到来方向が前方、後方、側方、上方の4方向に限定された後期音だけではなく、様々な方向から後期音が到来する場合についても、後方及び上方後期音エネルギー率の寄与が側方後期音エネルギー率の3~5割であるという結果と符合することが示された。そして、後期音のLEVへの寄与の度合いを判断する時、前方、後方、側方、上方の4方向成分に分解された後期音エネルギーによって判断して良いと言える。

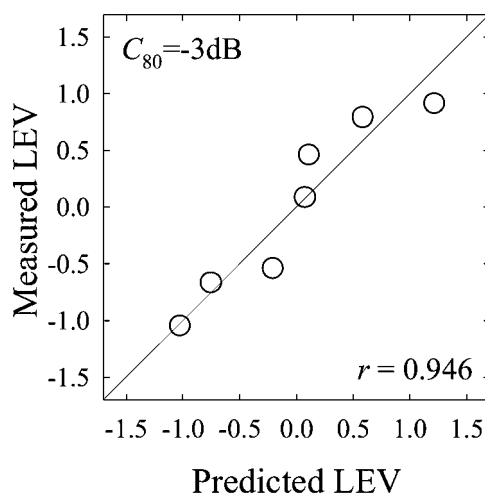


Fig.4 Comparison between predicted LEV by experiment2001 and measured LEV in experiment2003(1).

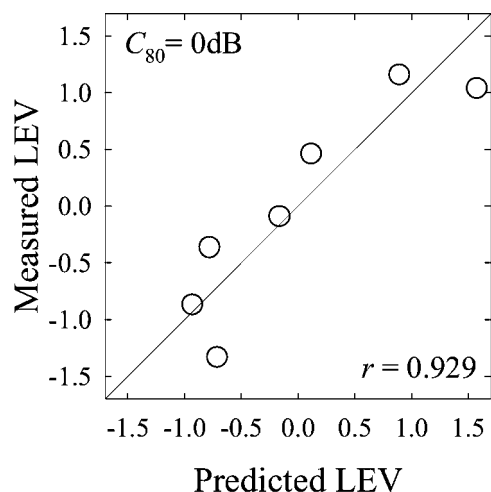


Fig.5 Comparison between predicted LEV by experiment2001 and measured LEV in experiment2003(2).

#### 4. まとめ

本研究の目的は、コンサートホールにおける後期音の到来方向分布が音に包まれた感じに及ぼす影響を明らかにし、そしてそれを考慮した音響的に優れたコンサートホールの設計法を確立することである。これを達成するために、本研究室ではこれまでに側方以外から到来する後期音を含む3次元的な音場を用いた心理実験を行い、後期音の到来方向と音に包まれた感じ(LEV)との関係について研究を行ってきた。

この一連の研究では、到来方向が前方、後方、側方、上方の4方向に限定された後期音を用いて心理実験を行い、その結果  $C_{80}$  が大きい場合には後方及び上方後期音エネルギー率の寄与は側方エネルギー率の3~5割であることを明らかにされた。しかしながら、実際のコンサートホール音場は、このように限定された4方向以外の様々な方向から音は到来する。そこで今回の心理実験では、後期音のLEVへの寄与の度合いを後期音の方向成分によって判断して良いかを明らかにするために、諸条件は到来方向が4方向に限定された場合の実験と同じにし、スピーカ配置を変えて実験を行った。

この実験で得られた結果を重回帰分析を行い、方向別エネルギー率のLEVへ寄与の度合いは、側方が最大であり、上方については側方の3~4割であり、後方については側方の5~6割であり、後期音の到来方向が4方向に限定された場合についての結果と符合すると言え

ることを示した。そしてさらに、後期音の到来方向が4方向に限定された実験結果から導出された重回帰式による予測値と比較したところ、この重回帰式によって予測計算されたLEVの心理的距離尺度が、本年度の実測のLEVの心理的距離尺度と近い値を示した。このことは、本年度の実験に関しても、この重回帰式が適用できることを示している。以上のことより、後期音のLEVへの寄与の度合いを判断する時、前方、後方、側方、上方の4方向成分に分解された後期音エネルギーによって判断して良いことが明らかにされた。

以上のことを踏まえ、今後の課題としては、これまでの心理実験によって導き出されたものが、実際にコンサートホールについても同じことを言えるかどうかを明らかにする必要がある。さらには、音場における本研究に基づくLEVについての明確な評価指標を示し、コンサートホールの音響設計に実用可能な方向に持っていくことが必要である。

#### 参考文献

- 1) 羽入敏樹, “ホール音場の評価法”, 日本音響学会誌 58, 27-32 (2002)
- 2) M. Morimoto, “The relation between auditory source width and the law of the first wave front,” Proc. Inst. Acoust. 14, 85 (1992)
- 3) W. de V. Keet, “The influence of early lateral reflections on the spatial impression,” Proc. 6th Int. Cong. Acoust. Tokyo, E-2-4 (1968)
- 4) M. Barron, “The subjective effects of first reflections in concert halls - The need for lateral reflections,” J. Sound Vib. 15, 475-494 (1971)
- 5) M. Barron and A. H. Marshall, “Spatial impression due to early lateral reflections in concert halls - The derivation of a physical measure,” J. Sound Vib. 77, 211-232 (1981)
- 6) 森本政之, 藤森久嘉, 前川純一, “見かけの音源の幅と音に包まれた感じの差異,” 日本音響学会誌 46, 449-457 (1990)
- 7) J. S. Bradley and G. A. Soulodre, “The influence of late arriving energy on spatial impression,” J. Acoust. Soc. Am. 97, 2263-2271 (1995)
- 8) J. S. Bradley and G. A. Soulodre, “Objective measures of listener envelopment,” J. Acoust. Soc. Am. 98, 2590-2597 (1995)
- 9) M. Morimoto and K. Iida, “A new physical measure for psychological evaluation of a sound field: Front/back energy ratio as a measure for envelopment,” J. Acoust. Soc. Am. 93, 2282 (1993)
- 10) 羽入敏樹, 木村翔, 千葉俊, “反射音の空間バランスに着目した音に包まれた感じの定量化方法,” 日本建築学会計画系論文集 No.520, 9-16 (1999)
- 11) H. Furuya, A. Wakuda, K. Anai and K. Fujimoto, “Contribution of directional energy components of late sound to listener envelopment,” FORUM ACUSTICUM SEVILLA 2002, RBA-02-002 (2002)
- 12) H. Furuya, K. Fujimoto, Y. J. Choi and N. Higa, “Arrival direction of late sound and listener envelopment,” Applied Acoustics 62, 125-136 (2001)
- 13) D. W. Robinson and L. S. Whiteele, “The loudness of directional sound fields,” ACUSTICA 10, 74-80 (1960)