

# コンサートホールにおける後期音エネルギーと到来方向分布が 音に包まれた感じに及ぼす影響

中野雄介

## 1. はじめに

音響的に優れたコンサートホールを設計するにはどうすればよいだろうか。これはコンサートホールの音響設計に携わる者にとって、永遠の課題である。

コンサートホールの音響評価は、最終的には人間の聴感に基づく主観的な評価であり、これは心理的な量である。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物理的な特性であり、これらの物理特性と心理量との関係を明らかにしていく必要がある<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、方向感や距離感、空間印象などの空間的属性、音の大きさ感や音色などの質的属性といった大きく三つの属性に分けられる<sup>2)</sup>。このうち空間的属性をとらえた要素として、1960年代後半から、初期反射音の到来方向が徐々に注目されるようになった。中でも側方から到来する初期反射音が「空間印象」と深く関わっていることが明らかにされてきた<sup>3)4)5)</sup>。

「空間印象」は、コンサートホール音場を評価するのに重要な心理的要因の一つである。「空間印象」には少なくとも「見かけの音源の幅」(Apparent Source Width: ASW)と「音の包まれた感じ」(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>。ASWは「直接音方向に直接音と時間的にも空間的にも融合して知覚される音像の大きさ」であり、LEVは「見かけの音源以外の音像によって、リスナのまわりが満たされている感じ、あるいは音に浸っている感じ」である。

その後の研究で、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に関する多くの知見が得られてきた。一方、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が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ている。

このような中、LG(後期側方反射音レベル)を提案したBradleyらによって、側方から到来する後期音がLEVに強く依存していることが言われてきた。一方、側方以外の方向から到来する後期音については、LEVに寄与しないとほとんど研究がなされなかった。しかし、実際のコンサートホール音場では後期音はさまざまな方向から到来しており、また実際にわれわれの耳も側方以外から到来する音についても知覚できている。したがって側方以外からの後期音についてもLEVにいくらかは寄与しているのではないかと考えられる。

そこで本研究室では数年前より、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の変化が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た<sup>8)</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、側方エネルギー率の寄与が最も大きいこと、 $C_{80}$ 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した<sup>9)</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。

しかし、コンサートホール音場のLEVを検討する際、後期音の到来方向分布だけでなく全後期音エネルギーもLEVに寄与すると考えられる。そこで今回の心理実験では後期音の到来方向分布だけでなく、初期音エネルギーに対する後期音エネルギーの割合 $C_{80}$ の値も併せて変化させた刺激を用いた心理実験を行い、側方、後方、上方の方向別エネルギー率並びに $C_{80}$ がそれぞれLEVに与える寄与の度合いについて検討した。

## 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包まれた感じの評価を求めた。スピーカの配置をFig.1に示す。スピーカシステムは直接音用スピーカ1個、初期音用スピーカ2個(前方斜め45°)、並びに後期音用スピーカ5個(側方2個、前方1個、後方1個(以上水平面内)、上方1個)で構成されている。

音源信号は無響室録音された「アルルの女」(G.Bizet作曲)の約10秒間である。全刺激対はMIDI制御されたシステムによりランダムに提示した。

### 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4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、 $C_{80}$ 並びに側方、後方、上方、前方から到来する後期音エネルギーの割合を変化させた計20個

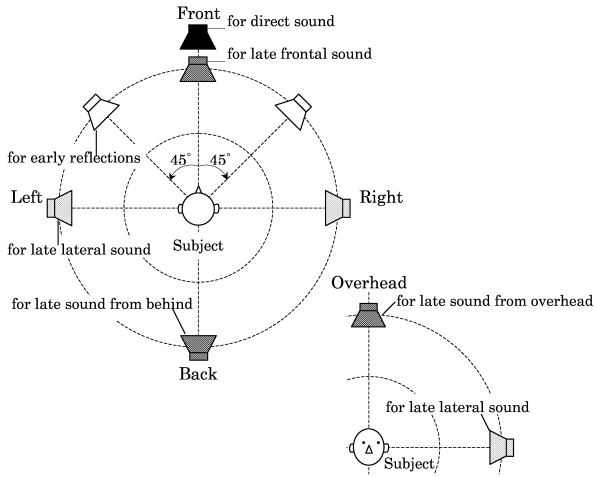


Fig.1 Arrangement of loudspeakers in an anechoic chamber.

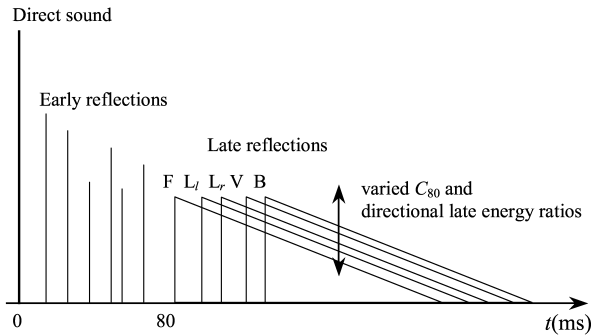


Fig.2 Signal configuration of the sound fields used in experiment ( $L$ =lateral,  $F$ =frontal,  $B$ =back,  $V$ =overhead).

とした。 $C_{80}$  並びに方向別後期音エネルギー率の変化幅は、各々、 $-5\sim+5\text{dB}$ 、 $0.05\sim 0.81$  とした。20 個の刺激を Table 1 に示す。刺激の呈示音圧レベル (Binaural  $SPL^{10}$ ) は  $63\text{dB}$  で一定である。

### 2.3 被験者

被験者は建築環境学を専攻している 20~23 歳の学生 14 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「音に包まれた感じ」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 20 個の音場すべての組み合わせ (190 対) を刺激対とし、各人に同一刺激対を 4 回ずつ判断させた。

## 3. 結果と考察

### 3.1 実験結果

得られた回答から Thurstone Case V に基づき心理的距離尺度を構成した。モデルの適合度の検定を行った結果、有意水準 5% で事実と適合していた。一意性並びに一致性の検定の結果は、いずれも有意水準 5% で有意であった (14 名  $\times$  4 回 = 56 回)。

距離尺度と  $C_{80}$  並びに前方を除く方向別後期音エネルギー率  $LE_{late}$ ,  $VE_{late}$ ,  $BE_{late}$  の関係を Fig.3 に示す。

Table 1 Twenty sound fields used in the experiment.

Stimulus No.	$C_{80}$ (dB)	Directional late energy ratio			
		$LE_{late}$	$VE_{late}$	$BE_{late}$	$FE_{late}$
1	-4.9	0.10	0.59	0.10	0.18
2	-4.5	0.19	0.41	0.23	0.15
3	-4.1	0.43	0.08	0.29	0.10
4	-3.4	0.10	0.81	0.05	0.05
5	-2.9	0.09	0.21	0.59	0.10
6	-2.4	0.31	0.10	0.51	0.05
7	-1.9	0.44	0.39	0.15	0.05
8	-1.2	0.22	0.10	0.05	0.65
9	-0.9	0.10	0.10	0.72	0.05
10	-0.3	0.32	0.19	0.10	0.41
11	0.3	0.18	0.69	0.05	0.05
12	0.8	0.09	0.32	0.21	0.41
13	1.2	0.65	0.29	0.05	0.05
14	1.5	0.26	0.29	0.28	0.09
15	2.3	0.20	0.55	0.15	0.05
16	2.6	0.17	0.16	0.55	0.05
17	3.1	0.15	0.54	0.09	0.2
18	3.7	0.10	0.42	0.40	0.11
19	4.5	0.60	0.20	0.11	0.10
20	5.0	0.76	0.11	0.06	0.06

ここで、本研究室によるこれまでの実験から、前方後期音は  $LEV$  への影響が小さいという結果が得られているため、以下では前方エネルギー率  $FE_{late}$  に関する考察は行わない。

Fig.3 より、 $LEV$  と  $C_{80}$  には弱い負の相関関係が認められる。すなわち、後期音エネルギーの初期エネルギーに対する割合が大きいほど、 $LEV$  が強く知覚される傾向にあることが分かる。しかしながら、 $LEV$  と方向別後期音エネルギー率の間には相関は認められず、両者の関係はこの結果からだけでは不明である。

### 3.2 重回帰分析による考察

実験で得られた結果を、 $C_{80}$  並びに方向別後期音エネルギー率の  $LEV$  に対する寄与の度合いという視点から明確にするために、 $LEV$  に関する尺度値を目的変数、 $C_{80}$  並びに  $LE_{late}$ ,  $VE_{late}$ ,  $BE_{late}$  を説明変数として重回帰分析を行った。算出した重相関係数並びに各物理量パラメータに対する標準偏回帰係数を Table 2 に示す。また、得られた回帰式から算出した  $LEV$  の尺度値と実験から得られた尺度値を比較したものを Fig.4 に示す。重相関係数は 0.932 であり、回帰精度は良好であると言える。

Table 2 より、 $C_{80}$  の標準偏回帰係数 (絶対値) は 3 つの方向別後期音エネルギー率のそれに比べて大きいことから、全後期音レベルの  $LEV$  への寄与が最も大きいことが分かる。方向別後期音エネルギー率について見ると、 $LE_{late}$  の標準偏回帰係数が  $BE_{late}$ ,  $VE_{late}$  に比べて大きく、 $LE_{late}$  の  $LEV$  への寄与が最大である

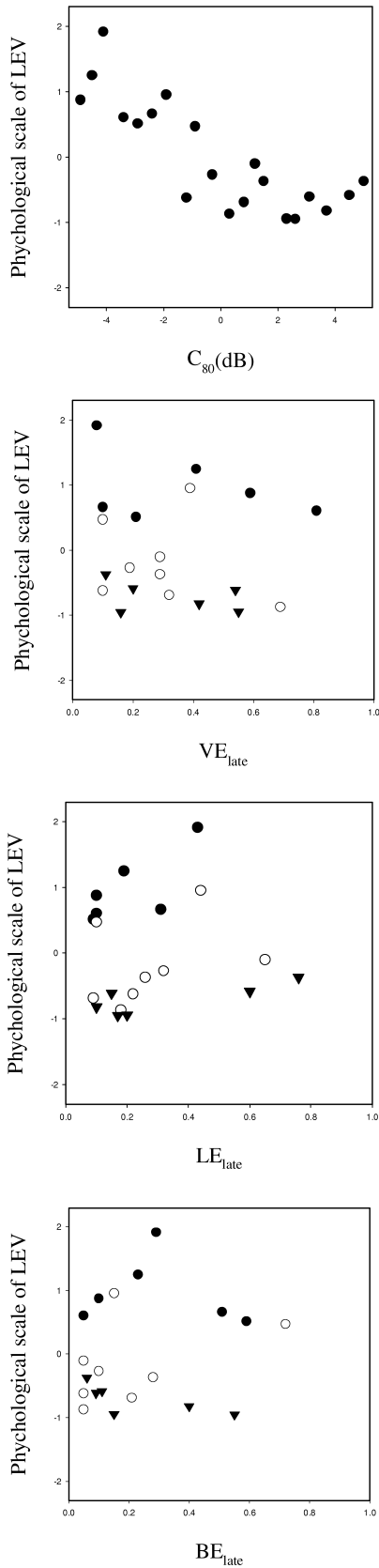


Fig.3 Psychological scale of LEV, ●:  $C_{80} = -5 \sim -2$  dB ○:  $C_{80} = -2 \sim +2$  dB ▼:  $C_{80} = +2 \sim +5$  dB.

Table 2 The result of multiple regression analysis between perceived LEV and  $C_{80}$  and three directional late energy ratios, significant at  $p < 0.005$ .

Multiple correlation coefficient	Standard regression coefficients			
	$C_{80}$	$LE_{late}$	$VE_{late}$	$BE_{late}$
0.932	-0.967	0.630	0.223	0.393

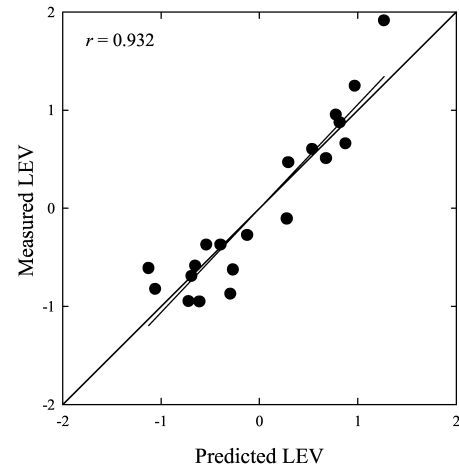


Fig.4 Comparison between predicted LEV and measured LEV,  $r$ : correlation coefficient.

ことが分かる。また、 $BE_{late}$  並びに  $VE_{late}$  の LEV への寄与は、各々、 $LE_{late}$  の約 62%、35% 程度である。これらの結果は、 $C_{80}$  が一定という条件下で得ている結果と符合するものである。

以上の結果から、音場の LEV を把握するためには、側方、後方、上方から到来する後期音の方向分布並びに後期音エネルギーの初期音エネルギーに対する割合を併せて検討する必要があることが確認された。

### 3.3 昨年度の実験との整合性

今回得られた心理実験の結果より、昨年度 (2001 年度) の心理実験との整合性を見てみる。今回の 20 個の音場による心理実験で得られた重回帰式を、2001 年度の 7 つの音場 ( $C_{80}$  は  $-3, 0, +3$  dB の 3 段階) にあてはめて LEV を予測計算してみる。この予測計算した LEV を  $LEV_P$  とし、平均 0、分散 1 で正規化したものを  $LEV_P^*$  とする。また、昨年度の実験で得られた LEV を平均 0、分散 1 で正規化したものを  $LEV^*$  とする。両者を比較したものをそれぞれ Fig.?? に示す。ここで両者の LEV を正規化したのは比較の際に尺度軸を同じとみなすためである。

グラフより  $C_{80}$  が小さい場合 ( $-3, 0$  dB) は関係が高いことが分かる。これより後期音エネルギーがある程度大きい場合、方向別後期音エネルギー率 ( $LE_{late}, VE_{late}, BE_{late}$ ) の LEV への寄与の度合いについて、今回の実験結果は昨年度の結果と傾向が同じであると認められる。よって  $C_{80} = -3 \sim 0$  dB 程度の範囲では、各物理指標値の LEV への寄与の度合いを明らかにできた。一方、 $C_{80}$  が大きい場合 ( $+3$  dB) は関係

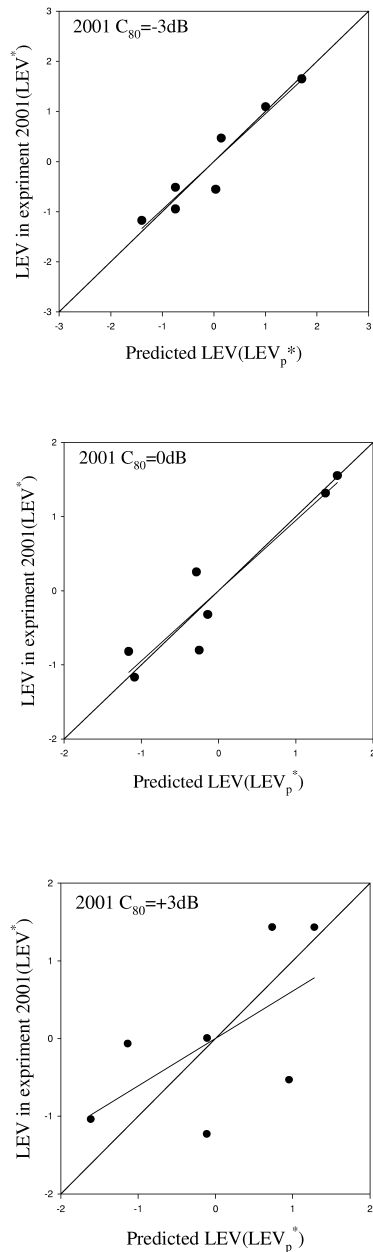


Fig.5 Comparison between predicted LEV and measured LEV in experiment2001.

が低い。これについては、昨年度の実験結果より  $C_{80}$  が大きいと後方及び上方後期音エネルギーの LEV への寄与の割合は非常に小さくなるからであり、今回の心理実験で得られた標準偏回帰係数の値は昨年度の3つの心理実験を平均したような結果になっているためであると考えられる。

以上より、後期音エネルギーがある程度大きい場合の、より普遍的なコンサートホールにおける後期音エネルギー及び到来方向分布による LEV への寄与の割合が確認できた。

#### 4. まとめ

本研究の目的は、コンサートホールにおける全後期

音レベル及び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することである。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。

これまでに本研究室では、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一連の心理実験を行い、後期音の到来方向と音と包まれた感じ (LEV) との関係について研究を行ってきた。その結果これらの関係についていくらかを明らかにしてきた。しかし、コンサートホール音場の LEV を検討する際、後期音の到来方向分布だけでなく全後期音エネルギーも LEV に寄与するのではないかと考えられる。そこで今回の心理実験では、後期音の到来方向分布だけでなく、全後期音レベルの値も併せて変化させた音場を用いた。そして側方、後方、上方の方向別エネルギー率並びに初期音エネルギーに対する後期音エネルギーの割合  $C_{80}$  がそれぞれ LEV に与える寄与の割合について検討した。

その結果、 $C_{80}$  の LEV への寄与が最も大きいことを明らかにした。また後期音の各方向成分では側方後期音エネルギー率の影響が最も大きく、後方及び上方後期音エネルギー率の寄与は側方の3割から6割であることを明らかにした。

また  $C_{80}$  を変化させた今年度の結果は、 $C_{80}$  を一定とした昨年度の結果と傾向が同じであることが認められた。これより、後期音エネルギーがある程度大きい場合の、より信頼性の高いコンサートホールにおける後期音エネルギー及び到来方向分布による LEV への寄与の割合が確認できた。

以上これらの結果を踏まえ、今後の課題としては、コンサートホール音場における後期音エネルギーとその到来方向分布を考慮した LEV の評価指標を提案すること、またそれを考慮したコンサートホールの音響設計法を確立することだと考える。

#### 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) H.Furuya, K.Fujimoto, Y.J.Choi and N.Higa, “Arrival direction of late sound and listener envelopment”, Applied Acoustics 62(2), 125-136(2001)
- 9) 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)
- 10) D.W.Robinson and L.S.Whitelee, “The loudness of directional sound fields”, ACUSTICA, 10, 74-80(1960)