

# コンサートホールにおける後期反射音の方向特性が音に包まれた感じに及ぼす影響

和久田 晃子

## 1. 序論

### 1.1 はじめに

1895年にSabineの残響式が提案されて以来、約100年間でコンサートホールの音響設計について様々な研究が成されてきた。コンサートホールの形状が直接的に支配するのは初期反射音領域(直接音発生後0~80ms)であり、以前の空間的印象に関する研究も、初期反射音のみに着目したものであった。しかし最近では直接音発生後80ms以降に受音点に到達する後期反射音も空間的印象に影響を与えることが明らかにされ、後期反射音に着目した「音の空間的印象」を評価する物理指標も提案されてきている。しかし、これらの物理指標を導出するための実験で用いられた音場は、ほとんどが平面的なものであり、3次元的な音場において後期反射音の到来方向が「音に包まれた感じ」に与える影響について注目され始めたのは、比較的最近のことである。

本研究では2つの心理実験によって3次元的な音場を含めた後期反射音の到来方向が「音に包まれた感じ」に与える影響を調べた。

### 1.2 研究の背景

コンサートホールの音場を評価する重要な心理的要因の一つとして“拡がり感”(Spatial impression)がある。側方反射音エネルギーに着目した指標の提案を皮切りに、横方向から到来する反射音と“拡がり感”の関連について多くの研究がなされてきた。同時に、“拡がり感”には見かけの音源の幅(Apparent source width: ASW)と音に包まれた感じ(Listener envelopment: LEV)の二つの性質があることが森本ら<sup>1)</sup>によって明らかにされ、評価語自体の曖昧さについても、近年整理されてきた。

このような状況の中、音に包まれた感じに関しては、Bradleyら<sup>2)</sup>が従来の側方エネルギーを表す指標に代えて絶対音圧レベルと空間情報の両方を表現できるLG(後期側方反射音レベル)を提案している。

一方、横方向以外の方向から到来する反射音については、“拡がり感”(おそらくASW)には寄与しないとされ、これまでほとんど研究がなされてこなかった。また、LEVを対象とした側方以外の空間情報を取り込んだ指標に関しては、森本ら<sup>3)</sup>による前後エネルギー比や羽入ら<sup>4)</sup>の研究によるSBTsなどの報告がある。

しかし、これまで提案されているLEVに関する物理指標は、いずれも平面的な音場を用いて導出されたものである。すなわち、反射音が3次元的に到来する音場の聴覚的効果についてはこれまで全く明らかにされておらず、したがって上記の指標の適用範囲についても不明確である。そこ

で、本研究室<sup>5)</sup>では、3次元的な反射音の到来が音に包まれた感じの知覚にとって重要な要因になるのではないかと考え、主に上方からの反射音の影響についてこれまで検討してきた。

### 1.3 研究の目的

本研究の目的は、後期音の到来方向と音に包まれた感じの関係を明らかにすることにある。そのために、今回2つの心理実験を行った。最初に、後期側方反射音レベルを一定にした音場を用いた実験1によってLEVが側方反射音だけに依存するのかどうかについて検討し、次に、側方、前方、上方、後方の4つの方向から到来する後期音レベルを独立に変化させた音場を用いた実験2によって各方向成分がLEVへ与える影響について検討した。

### 1.4 実験方法

実験は、無響室内において行い、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、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6個(側方2個、前方1個、後方1個(以上、水平面内)、上方2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」(Bizet作曲)の約10秒間である。全刺激対をMIDI制御されたシステムによりランダムに提示し、後の刺激が前の刺激に比べて音に包まれた感じを小さく感じるか大きく感じるかを回答させた。被験者は、建築音響の研究を行っている22~25才の学生6~8名である。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、数個の刺激音場による練習を行った。

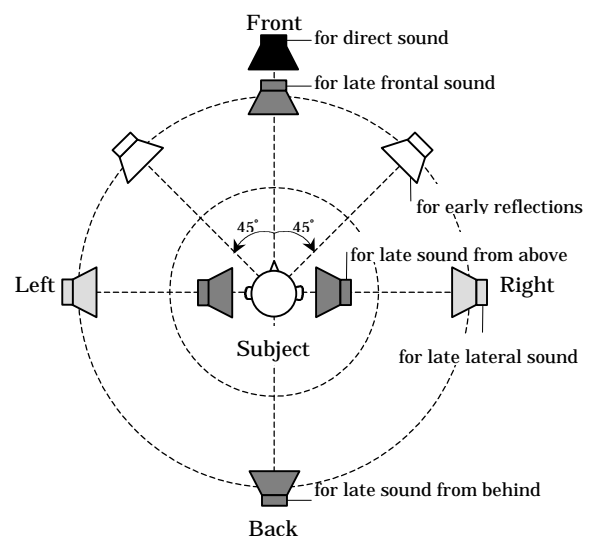


Fig.1 Arrangement of loudspeakers in an anechoic chamber.

また本論文では、後期音エネルギーの方向成分を規定する物理量として、後期側方反射音レベル  $LL_{80}$ 、後期前方反射音レベル  $FL_{80}$ 、後期上方反射音レベル  $VL_{80}$ 、並びに後期後方反射音レベル  $BL_{80}$  を、またトータルレベルとして  $L_0$  を、各々定義した(いずれも O.A. 値, dB)。これらは、後期音エネルギー(80 ms 以降)の各方向成分並びに全エネルギーを直接音エネルギー(全ての刺激音場で一定)によって基準化した相対レベルである。

## 2. 実験 1

LEV が後期側方反射音レベルだけに依存するののかどうかについて、基礎的な実験を行った。

### 2.1 実験条件

刺激音場の構成を Fig.2 に示す。刺激は、被験者正面からの直接音、6本の初期反射音(0~80 ms,  $LE=0.16$ )並びに後期音(80~ ms)から成り、直接音と初期音は全刺激で一定である。

刺激音場は7種類を設定した。それらの7個の刺激を Table 1 に示す。後期側方反射音レベルが一定の条件下で、刺激 No.1(側方), No.2(側方+前方), No.3(側方+前方+上方), No.4(側方+上方), No.5(側方+上方+後方), No.6(側方+後方)を、そして刺激 No.1 の側方反射音レベルを 6 dB 増加させた刺激 No.7(側方)を作成した。すなわち、刺激 No.1, 7 の後期音は側方だけから到来し、刺激 No.2~6 は、トータルレベルを一定に保ちながら刺激 No.1 に側方以外の後期音を付加した音場である。以上により、刺激 No.1~6 は後期側方反射音レベル  $LL_{80}$  が一定( $\pm 0.4$  dB)、刺激 No.2~7 はトータルレベル  $L_0$  が一定( $\pm 0.5$  dB)となる。

7個の刺激音場のすべての組み合わせを刺激対(21対)としてランダムに呈示した。被験者は6名であり、同一刺激対を8回ずつ判断してもらった。

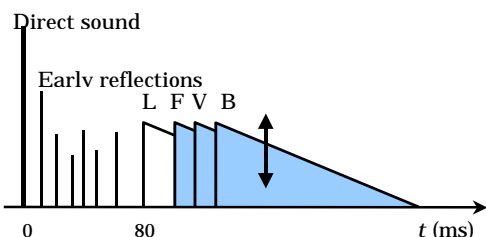


Fig.2 Signal configuration of the sound fields used in experiment 1 (L=lateral, F=frontal, V=overhead and B= back).

Table 1 Seven sound fields used in experiment 1.

Stimulus	Directional late sound levels (dB)				
	$L_0$	$LL_{80}$	$FL_{80}$	$VL_{80}$	$BL_{80}$
1	4.6	-1.1	-	-	-
2	7.4	-1.4	3.5	-	-
3	7.2	-0.9	0.7	-0.6	-
4	7.5	-1.2	-	2.8	-
5	6.8	-1.7	-	-0.9	1.0
6	7.3	-1.2	-	-	3.1
7	7.8	4.4	-	-	-

刺激の呈示音圧レベル(ダミーヘッド両耳音圧レベルから算出される Binaural SPL)は、刺激 No.1,7 が 63, 66 dBA, 刺激 No.2~6 が 64 dBA で一定である。また、残響時間は 1.8 s、 $C_{80}$  は刺激 No.1(6 dB)を除きほぼ 0 dB で一定である。

### 2.2 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 1% で事実上適合していた。距離尺度を算出する前に、被験者ごとに判別能力があるかどうか一意性の検定を行った。その結果、有意水準 5% ですべてのデータ(延べ6名×8回=48回分)について判別能力があるとみなせた。また、被験者間における判断の一致の度合いを見るために一致性の検定を行った。その結果、有意水準 5% で判断の基準が一致しているとみなせた。距離尺度の算出結果を Fig.3 に示す。

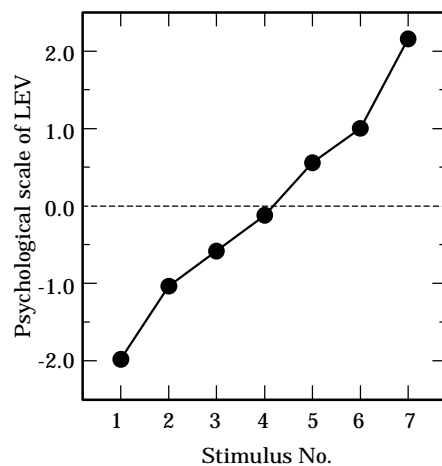


Fig.3 Psychological scale of LEV in experiment 1.  $LL_{80}$  is constant in stimuli No.1 to 6, and  $L_0$  is constant in stimuli No.2 to 7.

### 2.3 考察

結果を見ると、側方以外から後期音を付加した刺激 No.2~6 のいずれも、刺激 No.1 に比べて LEV は有意に強く知覚されている。したがって LEV は後期側方反射音レベルだけに依存するとは言えない。また、刺激 No.2~6 は刺激 No.1 に比べて  $L_0$  が約 3dB 大きい。従来から、LEV は聴取音圧レベルに影響を受けることが指摘されているが、上記の結果は聴取音圧レベルの増加による効果としても理解できる。

さらに、刺激 No.2~7 の結果について見てみる。これらの音場はすべて、トータルレベル  $L_0$  が一定である。また刺激 No.2~6 については  $LL_{80}$  も一定である。LEV は音場間で明らかに有意な差を呈している。これらの結果は後期音の到来方向に起因するものと考えられる。したがって、側方からの後期音をさらに増加させた刺激 No.7 において LEV は最も強く知覚されるものの、上方や後方からの後期音もまた LEV に影響していると言える。

## 2.4 実験 1 のまとめ

実験結果から側方以外から後期反射音を付加した刺激音場でも LEV に有意な知覚が見られることがわかり、LEV は後期側方反射音レベルだけに依存するとは言えないことが示された。そこで、次のステップとして、後期反射音を与える LEV への影響には、各到来方向によってどの程度の差があるのかを知る必要が出てくる。

## 3. 実験 2

後期音の LEV への寄与が到来方向によってどの程度異なるかについて、側方、前方、上方、後方の 4 つの方向から到来する後期音レベルを独立に変化させた音場を用いてさらに検討した。

### 3.1 実験条件

刺激音場の構成を Fig.4 に示す。刺激は、実験 1 と同様に直接音、6 本の初期反射音(0 ~ 80ms,  $LE = 0.16$ )並びに後期音(80 ~ ms)から成り、直接音と初期音は全刺激で一定である。

実験は、後期音の到来方向別に 4 回に分けて実施した。すなわち、側方、前方、上方、後方からの後期音をすべて付加した音場(刺激 No.1)を共通の基準音場として、側方エネルギーだけを変化させた場合(実験 2(a))、前方エネルギーだけを変化させた場合(実験 2(b))、上方エネルギーだけを変化させた場合(実験 2(c))、並びに後方エネルギーだけを変化させた場合(実験 2(d))の 4 種類である。刺激の数は、各方向別に後期音レベルを 7 ~ 11 dB の範囲内で 4 段階に変化させた計 13 個である。13 個の刺激を Table 2 に示す。ト

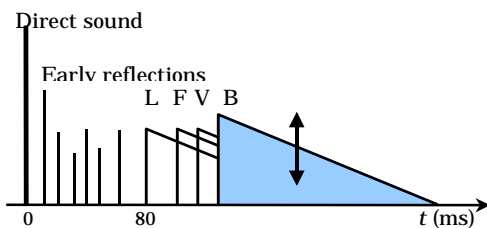


Fig.4 Signal configuration of the sound fields used in experiment 2 (L=lateral, F=frontal, V=overhead and B=back).

Table 2 Thirteen sound fields used in experiment 2.

Stimulus	Directional late sound levels (dB)				
	$L_0$	$LL_{80}$	$FL_{80}$	$VL_{80}$	$BL_{80}$
1	5.0				
2	5.7		-6.7	-3.7	-6.7
3	6.8		-6.3	-3.4	-6.3
4	8.1		-5.9	-3.3	-5.9
5	5.5	-3.5		-3.5	-6.3
6	6.3	-3.2		-3.3	-6.3
7	7.8	-3.5		-2.8	-6.3
8	5.2	-3.5	-6.7		-6.7
9	6.5	-3.4	-6.0		-6.0
10	7.7	-3.2	-6.3		-6.3
11	5.4	-3.8	-6.3	-3.6	
12	6.7	-3.1	-6.3	-3.3	
13	7.5	-3.4	-6.3	-3.2	

ータルレベルの変化幅は全刺激でおよそ 3dB、 $C_{80}$  は -2 ~ 3 dB の範囲である。

以上のようにして得られた各グループ 4 個ずつの音場について、すべての組み合わせ(6 対)を刺激対としてランダムに呈示した。被験者は 8 名であり、各人に同一刺激対を 8 回ずつ判断してもらった。

刺激の呈示音圧レベル(Binaural SPL)は全実験を通して 63 ~ 67 dBA である。残響時間は 1.8s で一定である。

### 3.2 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 1% 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(8 名 × 8 回 = 64 回分)。距離尺度の算出結果を Fig.5 に示す。

### 3.3 考察

$FL_{80}$  を変化させた場合を除き、LEV は各方向の後期音レベルと正の相関関係を示している。まず、後期側方反射音レベル  $LL_{80}$  と LEV の相関は非常に高く、これは従来の知見とも一致している。また、 $VL_{80}$  と  $BL_{80}$  に関しても相関係数は 0.98 を超えており、上方および後方から到来する後期音レベルが LEV に強く影響していることが分かる。

刺激 No.1 と各刺激間の尺度値の差(最大値)を算出すると、 $LL_{80}$  の 9 dB の変化幅に対して 3.38、 $FL_{80}$  (変化幅 10 dB)に対して 0.61、 $VL_{80}$  (変化幅 7 dB)に対して 2.92、そして  $BL_{80}$  (変化幅 11 dB)に対して 1.98 であり、前方の場合を除き、明らかに後期音のレベル変化が LEV の知覚に有意な差をもたらしていると言える。ただし、前方からの後期音レベルの変化は LEV に影響していない。

さらに、後期音の各方向成分による LEV への寄与の度合いを調べるために、LEV に関する尺度値を目的変数、各方向の後期音レベル  $LL_{80}$ 、 $FL_{80}$ 、 $VL_{80}$ 、 $BL_{80}$  を説明変数として重回帰分析を行った。結果を Table 3 に示す。重相関係数は 0.979 であり、回帰精度は良好である。 $LL_{80}$ 、 $FL_{80}$ 、 $VL_{80}$ 、 $BL_{80}$  と LEV の偏相関係数を見ると、 $LL_{80}$  が 0.965 と最も大きく、次いで  $VL_{80}$  の 0.942、 $BL_{80}$  の 0.910 となっている。これより LEV への寄与は、側方からの後期音レベルが最も大きく、そして、上方或いは後方からの後期音についても、側方反射音に比べると寄与の程度は低いものの LEV の知覚に影響していると言える。

Table 3 The result of multiple regression analysis between perceived LEV and four directional late levels,  $p < 0.005$ .

Multiple correlation coefficient	Partial correlation coefficients			
	$LL_{80}$	$FL_{80}$	$VL_{80}$	$BL_{80}$
	0.965	0.001	0.942	0.910

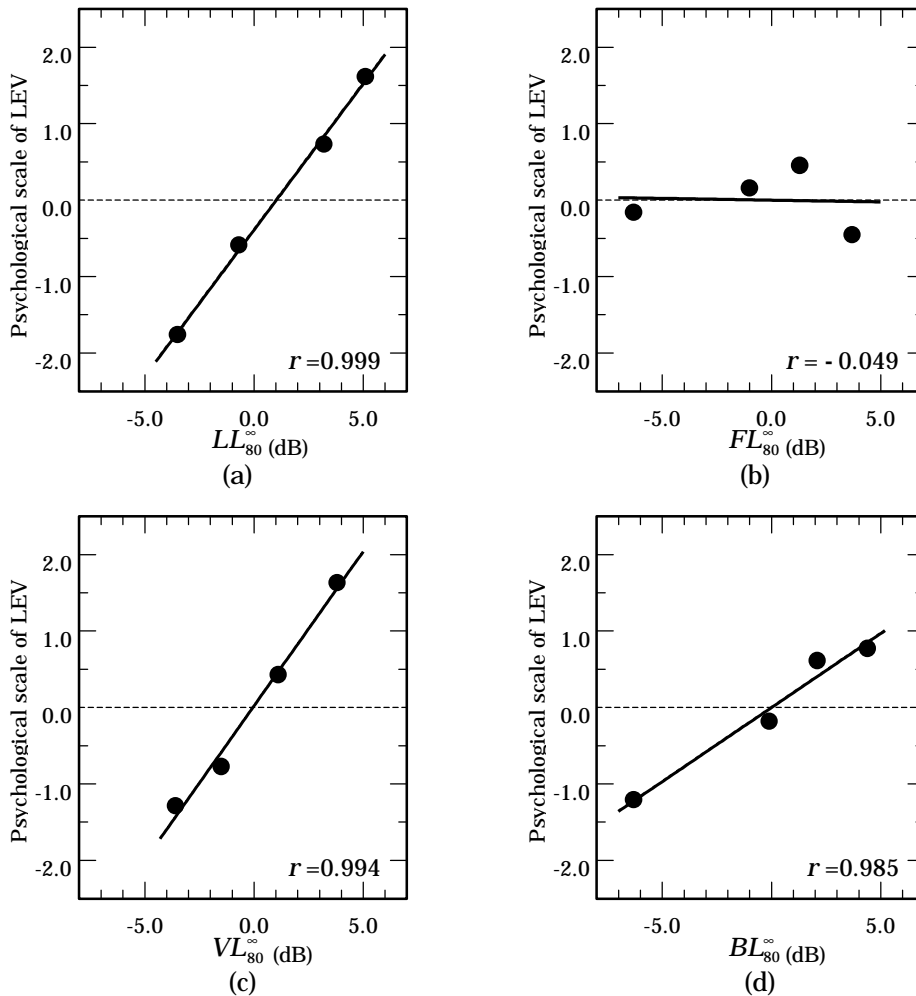


Fig.5 Psychological scale of LEV versus four directional late levels in experiment 2.

### 3.4 実験 2 のまとめ

実験結果から、前方から後期反射音を到来させた場合は LEV への影響は見られないが、他の各方向からの後期反射音は LEV に強く寄与することが示された。最も LEV への影響が大きかったのは、側方から来る後期反射音であり、従来の研究通りの結果であったが、後方及び上方からの後期音も、後期側方反射音ほどではないにしろ LEV とかなり高い相関を持つことが示された。この結果から LEV の物理指標を求めるには、三次元的な音場を用いて研究を進めていく必要があることが示唆される。

### 4. 結論

実験 1 の結果から、側方成分を全く有していない後期音によっても LEV に有意な差が生じること、さらに、実験 2 の結果から、上方並びに後方から到来する後期音も側方反射音ほどではないにしろ、LEV に強く影響することが示された。このことから、LEV を制御するためには全体の聴取音圧レベルとともに、側方以外の方向から到来する後期音レベル或いはそれらの割合についても配慮する必要があ

ることが示唆される。また今回の実験で用いた刺激音場は後期音の到来方向が限定されており、現実的なホール空間での LEV を説明するには十分な結果が得られていない。実際のホールの音響設計で LEV を採り入れるためには、より現実に近い音場でさらに検討することが必要である。

### 参考文献

- 1) 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, pp.449-457(1990)
- 2) J.S.Bradley and G.A.Soulodre: Objective measures of listener envelopment, J.Acoust. Soc. Am. 98(5), pp.2590-2597 (1995)
- 3) 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, p.2282(1993)
- 4) 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, pp.9-16(1999)
- 5) H.Furuya, K.Fujimoto, Y.Takeshima and H.Nakamura: Effect of early reflections from upside on auditory envelopment, Acoust. Soc. Jpn.(E) 16(2), pp.97-104 (1995)