

## 後期音の方向分布が音に包まれた感じに与える影響

### Effects of Distribution of Directional Late Sound Energy on Listener Envelopment

和久田晃子\*, 中野雄介\*\*, 古屋浩\*\*\*, 藤本一壽\*\*\*\*

Akiko WAKUDA, Yusuke NAKANO, Hiroshi FURUYA and Kazutoshi FUJIMOTO

The purpose of this study is to clarify the effect of late arriving sound on listener envelopment (LEV). In our previous work, it was shown that late sounds from above and behind the listener as well as lateral, which had a single directional component, significantly affected LEV when the ratio of early-to-late sound energy ( $C_{80}$ ) was constant. Furthermore, shown was the relation between  $C_{80}$  and directional late energy ratios (DLR), and perceived LEV. In this paper, two kinds of psychological experiments are performed with simulated sound fields in order to examine the relation between DLR and perceived LEV. In the first experiment, late sounds which consist of plural directional components are used. The previous findings about the contribution of DLR to LEV are confirmed also when late sounds come from arbitrary directions. In the second experiment, the effect of DLR on LEV is examined when the reverberation time is set to 2.5 s. The result shows that the contribution of overhead and back late energy ratios grows larger when reverberation time is longer.

**Keywords** : Concert hall acoustics, Listener envelopment, Directional late energy ratio, Reverberation time, Psychological experiment

コンサートホール音響, 音に包まれた感じ, 方向別後期音エネルギー率, 残響時間, 心理実験

#### 1. はじめに

みかけの音源の幅 (ASW) が主に初期音と関連しているのに対して, 音に包まれた感じ (LEV) は時間的に遅く到来する後期残響音 (以下, 後期音) の影響を強く受けると言われており, とりわけ側方から到来する後期音エネルギーに依存することが明らかになっている<sup>1)</sup>. 側方以外の方向から到来する反射音の影響については, Morimoto *et al.*<sup>2)</sup>, Hanyu *et al.*<sup>3)</sup>, Furuya *et al.*<sup>4)</sup> によって近年徐々に明らかにされつつあるが, ASW に比べると研究事例は少なく, 評価指標の確立には至っていない.

筆者らは, 聴き手のまわりにおける音像の空間的な広がりとして LEV を捉える観点から, 側方以外の方向成分についてもその影響を明らかにしておく必要があると考え, これまで, 3次元的な模擬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 の関係について検討してきた. その結果, 側方だけでなく上方および後方から到来する後期音も LEV へ寄与すること, 並びに全後期音エネルギーが一定の条件下における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<sup>5)6)</sup>. また, 全後期音エネルギーを変化させたときの全後期音エネルギーと方向別後期音エネルギー率の LEV への寄与の度合いについても明らかにした<sup>7)</sup>. これらの結果によって, 後期音の到来方向と LEV の関係を詳細に把握できたと考える.

さて, これまでの実験では, 後期音の方向別エネルギーの影響を直接的に調べるために, 後期音の到来方向を前後, 左右, 真上 (すなわち単一方向成分を有するよう) に設定して LEV との関係調べてきたが, 実際のホール音場では斜め方向から到来する (すなわち複数の方向成分を有する) 後期音も存在するので, このような条件の場合についても LEV に与える影響を明らかにしておく必要がある. さらに, これまでは残響時間を 1.8s で一定とし後期音の方向別エネルギーの LEV への影響について調べてきたが, 残響時間を長く設定した場合にもこれまでの知見が成り立

\* 空間システム専攻博士後期課程

\*\* 空間システム専攻修士課程

\*\*\* 九州共立大学

\*\*\*\* 都市・建築学部門

つかどうかを検討しておく必要がある。

そこで本稿では、複数の方向成分を有する後期音と LEV の関係および残響時間を長くしたときの後期音と LEV の関係を調べるために、次の 2 種類の心理実験を行った。まず実験 1 では、斜め方向から到来する後期音を含む模擬音場を用いた実験を行い、単一方向成分を有する後期音群を用いた場合に得られた方向別後期音エネルギー率と LEV の関係が、複数の方向成分を有する後期音の場合にも成り立つかどうかについて検討した。次に、実験 2 では、残響時間を 2.5s に設定して、側方、後方、上方から到来する後期音を含む模擬音場を用いた実験を行い、方向別後期音エネルギーと LEV との関係について検討した。

## 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呈示し、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。

音源信号は無響室録音された「アルルの女」(Bizet 作曲) の約 10s 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呈示した。

### 2.2 物理量

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  $LE_{late}$  (late :  $t = 80 \sim \infty$  ms, 以下同様)、上方後期音エネルギー率  $VE_{late}$ 、後方後期音エネルギー率  $BE_{late}$  並びに前方後期音エネルギー率  $FE_{late}$  を (1) 式のように定義した。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。

$$\begin{aligned} LE_{late} &= \int_{80}^{\infty} p_{\infty L}^2(t) dt / \int_{80}^{\infty} p^2(t) dt \\ VE_{late} &= \int_{80}^{\infty} p_{\infty V}^2(t) dt / \int_{80}^{\infty} p^2(t) dt \\ BE_{late} &= \int_{80}^{\infty} p_{\infty B}^2(t) dt / \int_{80}^{\infty} p^2(t) dt \\ FE_{late} &= \int_{80}^{\infty} p_{\infty F}^2(t) dt / \int_{80}^{\infty} p^2(t) dt \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 $p(t)$ ,  $p_{\infty}(t)$  は、各々無指向性マイクロフォン、双指向性マイクロフォンの出力音圧である。

### 2.3 被験者

被験者は建築学を専攻している 21~26 才の学生である (実験 1 : 7 名, 実験 2 : 7 名)。実験に先立ち、被験者には教示文および概念図を用いて“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。

## 3. 実験 1

これまでの実験では、後期音の方向別エネルギーの影響を直接的に調べるために、後期音を前後、左右、真上から (すなわち、(1) 式で規定される方向成分のうちのいずれか

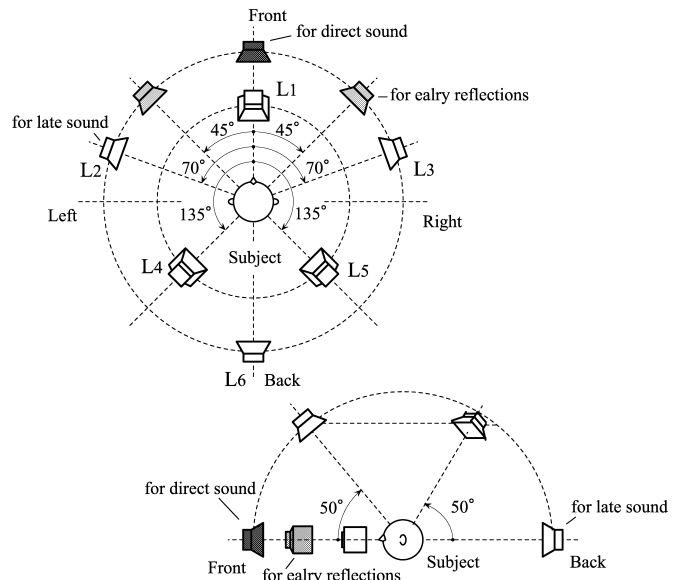


Fig. 1 Arrangement of loudspeakers in Experiment 1.

一つを有するように) 呈示したが、実際のホール音場では斜め方向から到来する ((1) 式で規定される複数の方向成分を有する) 後期音も存在する。そこで実験 1 では、斜め方向から到来する後期音を含むように模擬音場を設定し、方向別後期音エネルギー率と LEV の関係について検討した。

### 3.1 スピーカの配置

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 個並びに後期音用スピーカ 6 個 (水平面内に方位角  $\pm 70^\circ$  方向 2 個, 方位角  $180^\circ$  方向 1 個の計 3 個, 方位角  $0^\circ$  仰角  $50^\circ$  方向 1 個および方位角  $\pm 135^\circ$  仰角  $50^\circ$  方向 2 個) で構成されている。被験者の背後に配置したスピーカ以外のスピーカから呈示される後期音は、いずれも複数の方向成分を持つ。

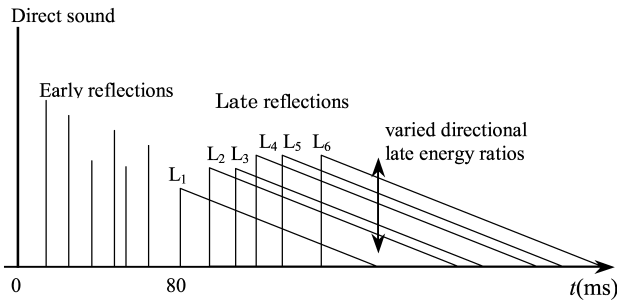
### 3.2 刺激音場

実験 1 は、 $C_{80}$  の値を  $-3$  dB と  $0$  dB の 2 段階に変化させた 2 つの実験から成る (実験 1(a) :  $C_{80} = -3$  dB, 実験 1(b) :  $C_{80} = 0$  dB)。刺激は、直接音、6 本の初期反射音 ( $t = 0 \sim 80$  ms,  $LE = 0.17$ ) 並びに 6 方向からの後期音 ( $t = 80 \sim \infty$  ms) から成り、直接音と初期音は全刺激で一定である。また、両実験において刺激の呈示音圧レベル (Binaural SPL<sup>8)</sup>) は約  $63$  dB, 残響時間は  $1.8$  s で一定である。刺激音場の構成を Fig. 2 に示す。

刺激音場は、いずれの実験においても方向別後期音エネルギー率を Table 1 に示すように設定した 7 個とした。また、7 個の音場のすべての組み合わせ (21 対) を刺激対とし、7 名の被験者に同一刺激対を 8 回ずつ判断させた。

### 3.3 結果と考察

得られた回答から Thurstone Case V に基づき心理的距



**Fig. 2** Structure of the sound fields used in Experiment 1. Late sound consists of plural directional energy components.

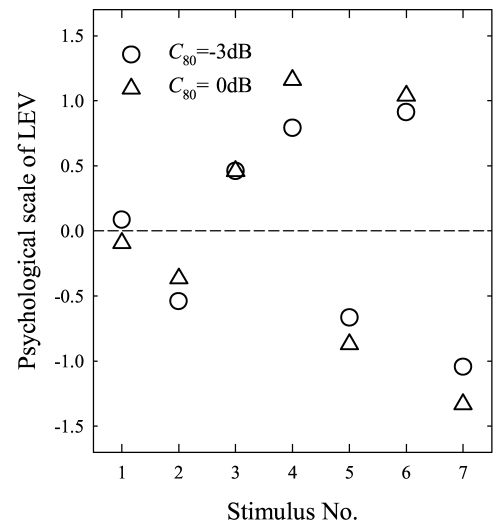
**Table 1** Seven sound fields used in Experiment 1.

Stimulus No.	BSPL (dB)	Directional late sound energy ratio			
		$LE_{late}$	$VE_{late}$	$BE_{late}$	$FE_{late}$
1		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	63	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

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%で事実に適合していた。一致性の検定の結果は有意水準5%で一致していた(7名×8回=56回分)。

距離尺度の算出結果を **Fig. 3** に示す。両実験において、 $LE_{late}$  が最大である刺激 No.4, 6 では他の方向成分の変化による LEV の有意差はみられず、側方成分が LEV に大きな影響を与えているといえる。一方、例えば刺激 No.3 と No.6 を比較してみると、 $LE_{late}$  の変化が大きいにもかかわらず LEV に有意な差は認められない(尺度値の差: 実験 1(a)= 0.45, 実験 1(b)= 0.58)。

以上のような傾向を、各方向別成分の 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、前方以外の方向別後期音エネルギー率を説明変数として重回帰分析を行った。結果を **Table 2** に示す。重相関係数は実験 1(a)( $C_{80}=-3\text{dB}$ ) で 0.980, 実験 1(b)( $C_{80}=0\text{dB}$ ) で 0.910 である。標準偏回帰係数をみると、いずれの実験においても  $LE_{late}$  は  $VE_{late}$ ,  $BE_{late}$  に比べて大きく、 $VE_{late}$  の LEV への寄与は  $LE_{late}$  の 28~44%,  $BE_{late}$  の寄与は 50~60% である。これは、後期音の到来方向を左右、前後、上方に限定した条件下で行った実験<sup>6)</sup>(実験 0 と呼ぶ) 結果と符合するものである。実験 0 で得た回帰式(実験 1(a) では  $C_{80}=-3\text{dB}$  の、実験 1(b)



**Fig. 3** Psychological scale of LEV in Experiments 1(a) and 1(b).

**Table 2** The results of multiple regression analyses between perceived LEV and three directional late energy ratios in Experiment 1, significant at  $p<0.005$ .

$C_{80}(\text{dB})$	Multiple correlation coefficient	Standard regression coefficients		
		$LE_{late}$	$VE_{late}$	$BE_{late}$
-3	0.980	1.558	0.433	0.783
0	0.910	1.686	0.739	1.012

では  $C_{80}=0\text{dB}$  の回帰式をそれぞれ適用) に今回の実験で用いた刺激音場の物理量を代入して算出した LEV の尺度値と、本実験結果との比較を **Fig. 4** に示す。本実験の結果は、実験 0 の結果とよく対応しているといえる。

以上の結果から、単一の方向成分を有する後期音を用いた実験より得られた方向別後期音エネルギー率と LEV の関係は、複数の方向成分を有する後期音を用いた場合にも成り立つことが確認された。

### 3.4 実験 1 のまとめ

斜め方向から到来する後期音を含む模擬音場を用いた実験を行い、後期音の方向成分と LEV の関係を検討した。その結果、これまでに単一の方向成分を有する後期音群を用いた実験から得られた方向別後期音エネルギー率と LEV の関係は、複数の方向成分を有する後期音の場合にも成り立つことが分かった。

### 4. 実験 2

本研究では、これまでに、3 次元的な模擬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 の関

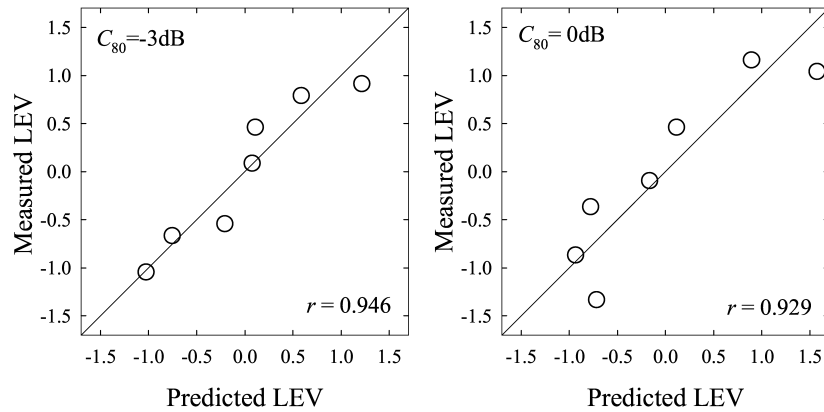


Fig. 4 Comparison between measured LEV in Experiment 1 and predicted LEV by the previous regression equation<sup>6)</sup>,  $r$ : correlation coefficient.

係について検討してきた。そして、側方だけでなく上方および後方から到来する後期音も LEV へ寄与すること、全後期音エネルギーが一定の条件下では、側方反射音の影響が最も大きく、上方と後方から到来する後期音は側方の 3 割から 6 割程度であることを明らかにした<sup>5)6)</sup>。また、全後期音エネルギーを変化させたときには、全後期音エネルギーと方向別後期音エネルギーが LEV へ最も大きく寄与することを示した<sup>7)</sup>。さらに本報の実験 1 では、後期音が斜め方向から到来する場合の実験を行い、方向別後期音エネルギーと LEV の関係は、後期音が斜め方向から到来する場合にも概ね同様であることを示した。

これら一連の実験では残響時間を常に 1.8s に設定してきたが、残響時間が異なる場合についても、後期音の方向別エネルギーと LEV がどのような関係であるかを検討する必要がある。そこで実験 2 では、残響時間を 2.5s に設定して、方向別後期音エネルギーと LEV の関係について検討した。

#### 4.1 スピーカの配置

スピーカの配置を Fig. 5 に示す。後期音の方向別エネルギーの影響を直接的に調べるために、前報<sup>7)</sup>までの実験と同じ配置(各スピーカが単一の方向成分を有するよう)にしている。すなわち、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)で構成している。

#### 4.2 刺激音場

実験 2 は、残響時間の値を 2.5s とし、 $C_{80}$  の値を  $-3\text{dB}$  と  $0\text{dB}$  の 2 段階に変化させた 2 つの実験から成る(実験 2(a):  $C_{80} = -3\text{dB}$ , 実験 2(b):  $C_{80} = 0\text{dB}$ )。刺激音場の構成を Fig. 6 に示す。

刺激音場は、いずれの実験においても方向別後期音エネ

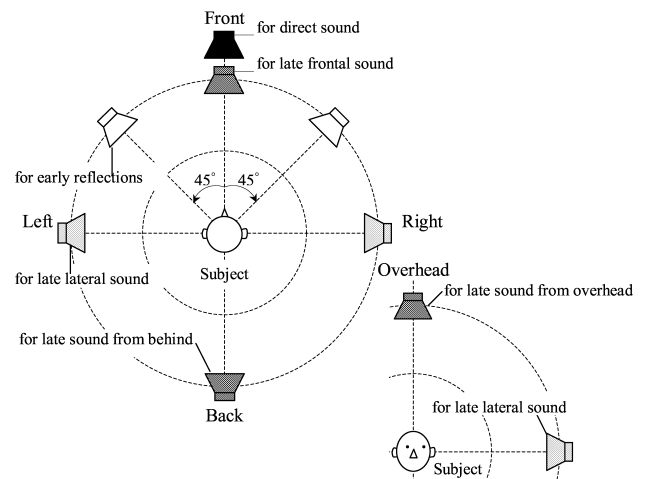


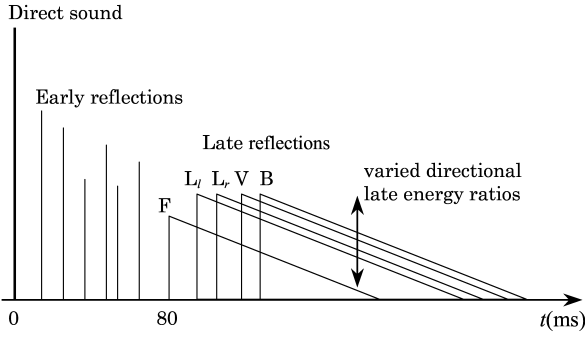
Fig. 5 Arrangement of loudspeakers in Experiment 2.

ルギー率を Table 3 に示すように設定した 7 個とした。また、7 個の音場のすべての組み合わせ (21 対) を刺激対とし、7 名の被験者に同一刺激対を 8 回ずつ判断させた。

#### 4.3 結果と考察

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% で事実に適合していた。一致性の検定の結果は有意水準 5% で一致していた (7 名  $\times$  8 回 = 56 回分)。

距離尺度の算出結果を Fig. 7 に示す。両実験において、 $LE_{\text{late}}$  が最大である刺激 No.4, 6 では他の方向成分の変化による LEV の有意差はみられず、側方成分が LEV に大きな影響を与えているといえる。一方、刺激 No.2 と No.7 ( $VE_{\text{late}}$  が最大で、 $LE_{\text{late}}$  と  $BE_{\text{late}}$  の大小が逆転している音場の組み合わせ) を比較してみると、LEV に有意な差は認められない (尺度値の差: 両実験とも 0.62)。ま



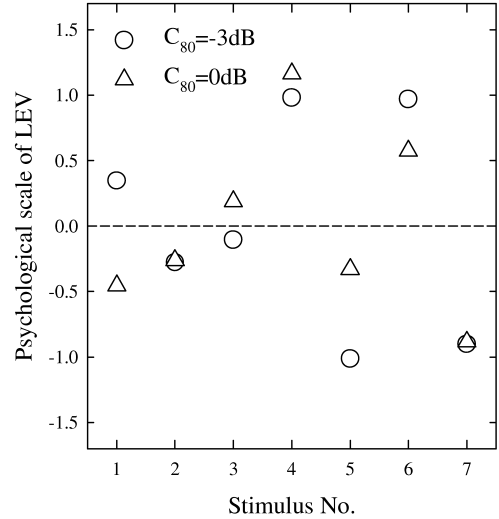
**Fig. 6 Structure of the sound fields used in Experiment 2 (F=frontal, L=lateral, V=overhead, and B=behind; subscripts  $l$  and  $r$ : left and right).**

**Table 3 Seven sound fields used in Experiment 2.**

Stimulus No.	$BSPL$ (dB)	Directional late sound energy ratio			
		$LE_{late}$	$VE_{late}$	$BE_{late}$	$FE_{late}$
1		0.30	0.30	0.30	0.10
2		0.25	0.60	0.05	0.10
3		0.25	0.10	0.55	0.10
4	63	0.60	0.25	0.05	0.10
5		0.10	0.25	0.55	0.10
6		0.60	0.10	0.20	0.10
7		0.10	0.60	0.20	0.10

た、実験 2(b) の刺激 No.3 と No.6 を比べると、 $LE_{late}$  の変化が大きいにもかかわらず LEV に有意な差は認められない (尺度値の差 : 0.39)。

以上のような傾向を、各方向別成分の 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、前方以外の方向別後期音エネルギー率を説明変数として重回帰分析を行った。結果を **Table 4** に示す。重相関係数は、実験 2(a) ( $C_{80}=-3\text{dB}$ ) で 0.983、実験 2(b) ( $C_{80}=0\text{dB}$ ) で 0.976 である。標準偏回帰係数をみると、いずれの実験においても  $LE_{late}$  は  $VE_{late}$ 、 $BE_{late}$  に比べて大きく、 $VE_{late}$  の LEV への寄与は  $LE_{late}$  の 65~88%、 $BE_{late}$  の寄与の度合いは 70~93% である。 $LE_{late}$  に対する  $VE_{late}$ 、 $BE_{late}$  の寄与の割合は、残響時間を 1.8s として行った以前の実験<sup>6)</sup> (3.3 で述べた実験 0) の結果に比べて大きくなっており、残響時間が長くなると各方向別後期音エネルギー率の LEV への寄与の度合いの差が小さくなる傾向がみられる。また、実験 0 で得られている重回帰式 (実験 2(a) では  $C_{80}=-3\text{dB}$  の、実験 2(b) では  $C_{80}=0\text{dB}$  の回帰式をそれぞれ適用) に今回の実験で用いた刺激音場の物理量を代入して算出した LEV の尺度値と、本実験結果との比較を **Fig. 8** に示す。図より、 $C_{80}=-3\text{dB}$  のときは



**Fig. 7 Psychological scale of LEV in Experiments 2(a) and 2(b).**

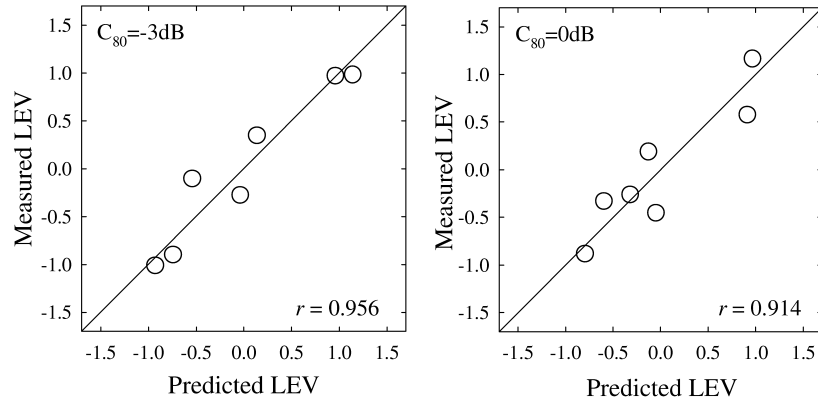
**Table 4 The results of multiple regression analyses between perceived LEV and three directional late energy ratios in Experiment 2, significant at  $p<0.005$ .**

$C_{80}(\text{dB})$	Multiple correlation coefficient	Standard regression coefficients		
		$LE_{late}$	$VE_{late}$	$BE_{late}$
-3	0.983	2.897	1.888	2.029
0	0.976	8.375	7.354	7.823

実験 0 の結果とよく対応しているが、 $C_{80}=0\text{dB}$  のときは、 $C_{80}=-3\text{dB}$  に比べて相関係数が低いことが分かる。これは、 $C_{80}=0\text{dB}$  のときは、 $LE_{late}$  に対する  $VE_{late}$ 、 $BE_{late}$  の寄与の割合がより大きくなっているためであると考えられる。すなわち、残響時間を長くすると、各方向別後期音エネルギー率の LEV への寄与の度合いの差が小さくなる傾向がみられ、その傾向は  $C_{80}$  の値が大きいほど顕著である。

#### 4.4 実験 2 のまとめ

残響時間を 2.5s に設定した模擬音場を用いた心理実験を行い、方向別後期音エネルギー率と LEV の関係について検討した。その結果、後期音の方向別エネルギー率の LEV への寄与の度合いは、側方が最も大きく、上方および後方は側方の 7 割から 9 割の寄与があること、残響時間が長くなると方向別後期音エネルギー率の LEV への寄与の度合いの差が小さくなるという傾向が認められた。この結果か



**Fig. 8 Comparison between measured LEV in Experiment 2 and predicted LEV by the previous regression equation<sup>6)</sup>,  $r$ : correlation coefficient.**

ら、残響時間が 2.5s(長い)の場合も LEV は後期音の方向分布と関係があり、その傾向は残響時間が 1.8s(やや短い)の場合の後期音の方向分布と LEV の関係に似ているものの、影響の度合いは残響時間の長さによって異なることが分かった。

今後は残響時間を 1.8s より短く設定した音場を用いて、方向別後期音エネルギーと LEV の関係を更に詳しく検討する必要がある。

## 5. おわりに

後期音の到来方向分布が LEV に与える影響を検討するために、2種類の心理実験を行った。まず、斜め方向から到来する後期音を含む刺激を用いた実験 1 を行い、複数の方向成分を有する後期音を用いた場合でも、単一方向成分のみ有する後期音群を用いた実験で得られた知見が成り立つことを確認した。このことから、既往の研究で得た方向別後期音と LEV との関係は、後期音の到来方向だけではなく、エネルギーの方向成分に関しても成り立つことが示された。

次に実験 2 では、残響時間を 2.5s に設定したときの方向別後期音エネルギーと LEV との関係について検討した。その結果、後期音の方向別エネルギーの LEV への寄与の度合いは、側方後期音エネルギーの影響が最も大きく、後方および上方後期音エネルギーの寄与の度合いは側方の 7 割から 9 割となり、残響時間が 1.8s のときよりもその割合が大きくなることが分かった。これは、残響時間が長くなると方向別後期音エネルギーの寄与の差が小さくなることを示しており、今後、残響時間を変化させて方向別後期音エネルギーと LEV との関係をより詳しく検討する必要があることが示唆された。

## 謝辞

心理実験およびデータ整理には山下勝広(九州大学)、今崎雄太、末國周祐(九州共立大学)各君の協力を得た。本研究の一部は、研究拠点形成費(21世紀COEプログラム)補助金若手研究者研究活動経費(受給者 和久田晃子)によるものである。ここに記して感謝します。

## 参考文献

- 1) J.S.Bradley and G.A.Soulodre: Objective measures of listener envelopment, *J. Acoust. Soc. Am.*, **98**, 2590-2597, 1995.
- 2) M.Morimoto, K.Iida and K.Sakagami: The role of reflections from behind the listener in spatial impression, *Applied Acoustics*, **62**, 109-124, 2001.
- 3) T.Hanyu and S.Kimura: A new objective measure for evaluation of listener envelopment focusing on the spatial balance of reflections, *Applied Acoustics*, **62**, 155-184, 2001.
- 4) H.Furuya, K.Fujimoto, Y.Takeshima and H.Nakamura: Effect of early reflections from upside on auditory envelopment, *J. Acoust. Soc. of Japan(E)*, **16**, 97-104, 1995.
- 5) H.Furuya, K.Fujimoto, Y.J.Choi and N.Higa: Arrival direction of late sound and listener envelopment, *Applied Acoustics*, **62**, 125-136, 2001.
- 6) A.Wakuda, H.Furuya, K.Fujimoto, K.Isogai and K.Anai: Effects of arrival direction of late sound on listener envelopment, *Acoust. Sci. and Tech.*, **24**, 179-185, 2003.
- 7) 和久田晃子, 中野雄介, 古屋浩, 藤本一壽: 後期音のレベルおよび方向特性が音に包まれた感じに与える影響, 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4号, 145-149, 2003年7月.
- 8) D.W.Robinson and L.S.Whittle: The loudness of directional sound fields, *ACUSTICA*, **10**, 74-80, 1960.