

コンサートホールにおける後期音の方向分布と音に包まれた感じの関係

和久田晃子

1. 序論

コンサートホールの音響の良し悪しは、ホール空間における物理的な音響現象が客席の聴取者に与える心理的影響によって評価される。したがって、良い音響のコンサートホールを設計するためには、この二つの関係を的確に捉えた音場評価手法が必要である。

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に空間印象 (Spatial impression) があるが、これは見かけの音源の幅 (ASW) と音に包まれた感じ (LEV) の二つの性質に区別して考えられる¹⁾ ことが近年明らかにされ、ASW は初期音と、LEV は後期音と関連が深いことが一般に認知されつつある。

本研究では、ホールの空間印象について、特に LEV と後期音の關係に着目し、この關係を考慮したホール音場の評価手法の提案を目的としている。

1960 年代以降、初期音と関連付けられて研究されてきた空間印象は、現在では ASW であると理解されている。多くの研究事例から、側方初期反射音が ASW に大きく寄与することが明らかにされ、*LF* などの今日よく知られている指標も提案されてきた。一方、90 年代に入ってから、後期残響音と LEV に関する研究が徐々に増えつつある。研究事例はまだ少ないが、LEV に関する研究で得られた知見は ASW とは異なる部分も多く、音響設計手法に大きな影響を与える可能性がある。このような中で、LEV に関する評価指標もいくつか提案されており、例えば、Bradley ら³⁾ による *LG* (後期側方反射音レベル)、側方以外の空間情報を取り込んだ森本ら²⁾ による前後エネルギー比、そして羽入ら⁴⁾ による *SBTs* などがある。しかし、これらの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り、実際のコンサートホールのような 3 次元的な音場に適用したときの有効性は明らかではない。

本研究では、側方以外から到来する後期音についても、LEV に与える影響を検討するべきであると考え、これまでに側方以外から到来する後期音も含めた 3 次元的な模擬音場を用いて一連の心理実験を行い、後期音の到来方向と LEV の關係について検討してきた⁵⁾⁶⁾。その結果、側方後期音レベルに比べて寄与は小さいも

の、後方および上方後期音レベルも LEV への寄与があることがわかり、コンサートホールにおける LEV を検討する際には、側方だけでなく後方や上方の後期音エネルギーも併せて考慮する必要があることが示唆された。

しかし、実際の音場設計において後期音レベルを到来方向別に独立して上昇させるようなことは難しく、したがって、ある後期音レベルが設定された場合に、その方向別エネルギーの割合が LEV とどのように関係があるかを明らかにする必要があると考えられる。本研究室がこれまでに行ってきた心理実験では、刺激音の方向別後期音レベルを個別に変化させたために全後期音レベルが一定ではなく、後期音の方向別エネルギーの割合と LEV との關係についてはまだ検討できていない。

そこで本論文では、全後期音レベルを一定に設定した心理実験を行い、側方、後方、上方の方向別エネルギー率と LEV の關係について検討した。

2. 音響心理実験

後期音エネルギーの到来方向分布と LEV の關係を調べるために、全後期音レベルを一定 (C_{80} を一定) とし、側方、後方、上方の 3 方向から到来する後期音エネルギーの割合を変化させた 7 個の音場を用いて心理実験を行った。

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」(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呈示した。

2.2 刺激音場

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

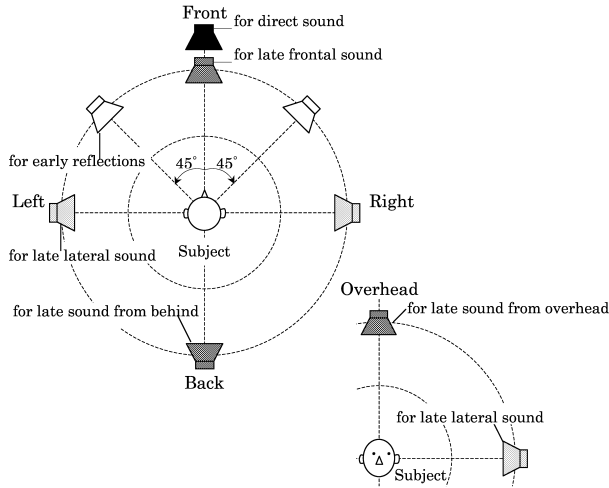


Fig.1 Arrangement of loudspeakers in an anechoic chamber.

下同様), 前方後期音エネルギー率 FE_{late} , 後方後期音レベル BE_{late} 並びに 上方後期音エネルギー率 VE_{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。

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

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。

実験は、 C_{80} の値を -3dB, 0dB, +3dB の 3 段階に変化させた 3 つの実験から成る (実験 1 : $C_{80} = -3$ dB, 実験 2 : $C_{80} = 0$ dB, 実験 3 : $C_{80} = +3$ 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 4 方向からの後期音 ($t = 80 \sim \infty$ ms) から成り、直接音、初期音並びに前方後期音エネルギー率 ($FE_{late} = 0.10$) は全刺激で一定である。また、全ての実験において刺激の呈示音圧レベル (Binaural SPL) は約 63dB、残響時間は 1.8 秒で一定である。刺激音場の構成を Fig.2 に示す。

2.3 被験者

被験者は建築環境学を専攻している 22 ~ 26 才の学生 8 名であり、実験 1 ~ 3 とともに同一人である。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

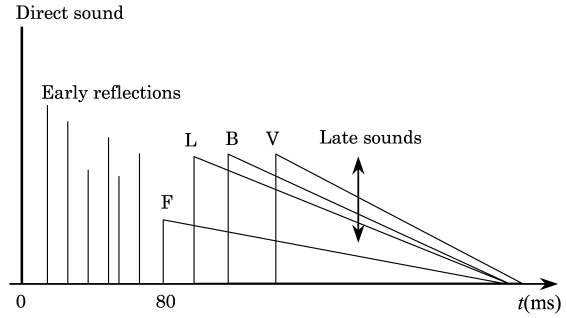


Fig.2 Signal configuration of the sound fields used in experiment (L=lateral, F=frontal, B=back and V=overhead).

Table 1 Seven soundfields in each experiment.

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

刺激音場は、いずれの実験においても方向別エネルギー率を Table 1 に示すように設定した 7 個とした。各実験音場の測定値は Fig.3 に示すとおりである。図中のグレーの丸印は、参考として既存の 6 ホールにおける実測結果⁷⁾⁸⁾を示している。ここで、各方向別後期音エネルギー率は合計が 1 になるように基準化したものである ($LE_{late}^*, VE_{late}^*, GE_{late}^* = FE_{late}^* + BE_{late}^*$)。実験で用いた 7 音場は、既存ホールにおける実測値 (平均値および変化幅) を参考にしながら、各方向 (側方、後方、上方) のエネルギーの割合が等しい刺激 No.1 ($LE_{late} = BE_{late} = VE_{late} = 0.30$) に、前方以外のエネルギーの割合を 3 段階に変化させた刺激 No.2 ~ 7 を加えたものである。

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 個の音場の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

得られた回答から Thurstone Case V に基づく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。

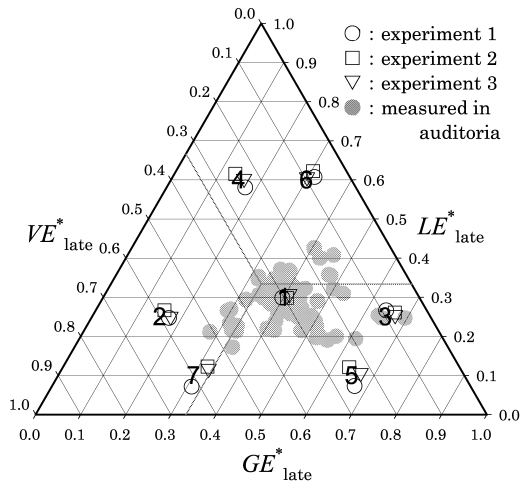


Fig.3 Distribution of directional late energy ratio used in experiment and measured in concert auditoria.

距離尺度の算出結果を Fig.4 に示す。ここで、刺激 No.2~7 の音場は、 LE_{late} , BE_{late} , VE_{late} のいずれかが 1 つが等しい場合、他の 2 つのエネルギー率の大小関係が逆になるように設定されている (Fig.3)。例えば、刺激 No.2 と刺激 No.3 は、 LE_{late} が 0.25 で等しく BE_{late} と VE_{late} の大小関係が逆になっている音場である。

まず、 LE_{late} が等しく BE_{late} と VE_{late} の値が逆になっている 2 つの音場 (刺激 No.5, 7($LE_{late}=0.10$)), 刺激 No.2, 3($LE_{late}=0.25$), 刺激 No.4, 6($LE_{late}=0.60$)) を比較してみる。実験 1~3 のいずれにおいても、両刺激間の尺度値の差は小さく (0.68 以下) 有意な差は認められない。このことは、後方後期音と上方後期音の LEV への影響度合いにはほとんど差がないことを示している。次に、 BE_{late} が等しく LE_{late} と VE_{late} の値が逆転している 2 つの音場 (刺激 No.2, 4($BE_{late}=0.05$), 刺激 No.6, 7($BE_{late}=0.20$), 刺激 No.3, 5($BE_{late}=0.55$)) を比較してみる。 BE_{late} の値が小さい刺激 No.2, 4 および刺激 No.6, 7 の場合には、両刺激間に明らかな差があるものの (1.10 ~ 3.01)、刺激 No.3, 5 間には、いずれの実験においても有意な差は認められない。すなわち、後方後期音エネルギー率が大きい場合、側方後期音と上方後期音の LEV への影響度合いに差はない。同様に、 VE_{late} が等しく LE_{late} と BE_{late} の値が逆転している 2 つの音場 (刺激 No.3, 6($VE_{late}=0.10$), 刺激 No.4, 5($VE_{late}=0.25$), 刺激 No.2, 7($VE_{late}=0.60$)) を比較しても、 VE_{late} の値が 0.60 と大きい場合には差が認められず、側方後期音と後方後期音の影響度合いに差がないといえる。

以上のような傾向を、各方向別後期音エネルギー率の

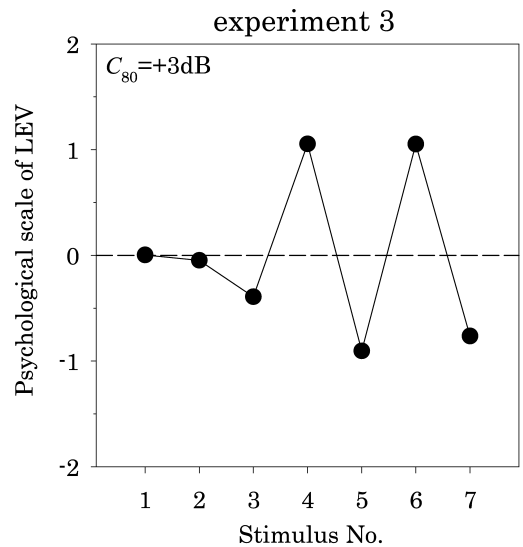
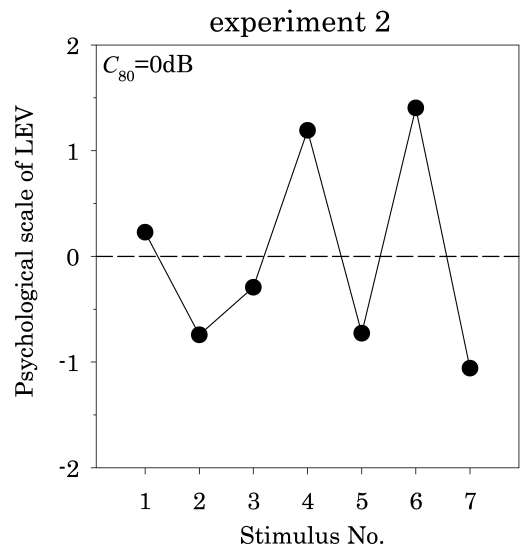
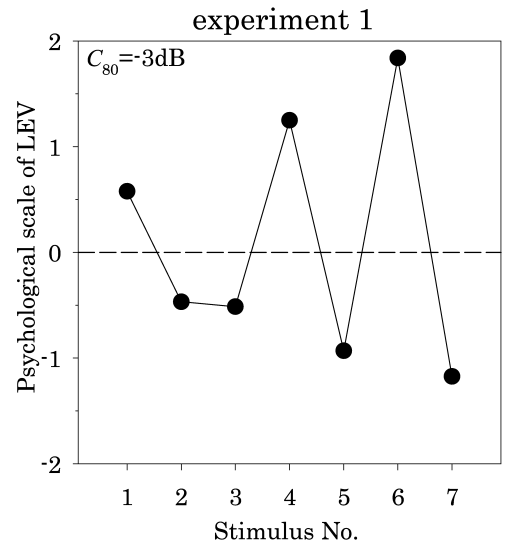


Fig.4 Psychological scale of LEV in three experiments.

Table 2 The results of multiple regression analysis between perceived LEV and three directional late sound energy ratios, $p < 0.01$ for $C_{80} = -3\text{dB}$, $p < 0.005$ for $C_{80} = 0\text{dB}$, $+3\text{dB}$.

$C_{80}(\text{dB})$	Multiple correlation coefficient	Standard regression coefficients		
		LE_{late}	BE_{late}	VE_{late}
-3	0.989	1.791	0.870	0.860
0	0.990	1.586	0.722	0.486
+3	0.997	1.086	-0.004	0.200

LEV に対する寄与の割合という視点から明確にするために、LEV の尺度値を目的変数、方向別後期音エネルギー率 LE_{late} , BE_{late} , VE_{late} を説明変数として重回帰分析を行った。結果 (重相関係数、標準偏回帰係数) を Table 2 と Fig.5 に示す。重相関係数は実験 1 ($C_{80} = -3\text{dB}$) で 0.989、実験 2 ($C_{80} = 0\text{dB}$) で 0.990、実験 3 ($C_{80} = +3\text{dB}$) で 0.997 であり、回帰精度はいずれも良好である。

Fig.5 より、いずれの実験においても、 LE_{late} の標準偏回帰係数は BE_{late} , VE_{late} に比べて大きく、 LE_{late} の LEV への寄与が最も大きいことがわかる。また、 BE_{late} 並びに VE_{late} の LEV への寄与は、 LE_{late} の 3~5 割でありほぼ同程度といえる。ただし、 $C_{80} = +3\text{dB}$ の場合には、 BE_{late} , VE_{late} の標準偏回帰係数は各々 -0.004, 0.200 であり、LEV への寄与は非常に小さい。

これらの結果から、全後期音レベルの大きさに関わらず側方後期音エネルギー率の影響が最も強いこと、また後方並びに上方後期音エネルギー率については、ほぼ同程度の LEV への影響があることが示された。特に、後期音レベルがある程度大きい場合 ($C_{80} = -3 \sim 0\text{dB}$) には、後方並びに上方から到来する後期音の寄与は無視できないといえる。このことから、それらを含めた後期音の到来方向分布を考慮することの重要性が示唆される。

4. 結論

本論文では、全後期音レベルを一定に設定して、側方、後方、上方の方向別エネルギー率を変化させた心理実験を行い、コンサートホールにおける後期音の方向分布と音に包まれた感じの関係について検討した。その結果、側方後期音エネルギー率は全後期音レベルの値に関わらず LEV に大きく寄与すること、後方および上方後期音エネルギー率の LEV への寄与は同程度であり、側方成分の寄与よりも小さいことがわかった。また、全後期音レベルが大きい場合には、側方、後方、上方い

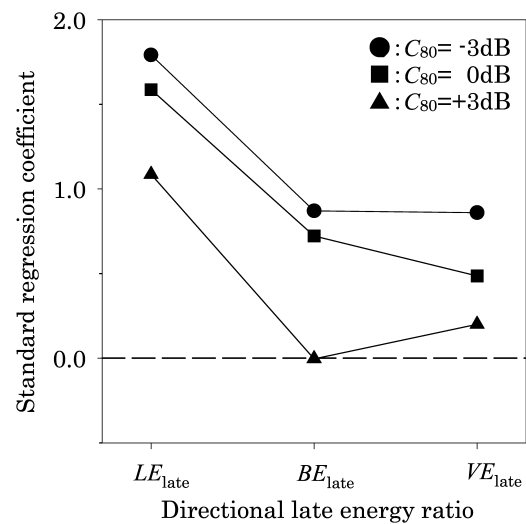


Fig.5 Standard regression coefficients for three directional late energy ratios.

ずれの方向別後期音エネルギー率も LEV に影響を与えるが、全後期音レベルが小さい場合には、後方および上方後期音エネルギー率の LEV への寄与は非常に小さいことがわかった。

以上のように、本研究によって後期音の方向特性と LEV の関係について明らかにすることができた。すなわち、LEV を検討する際には、後期音の到来方向のバランスを考慮する必要があることが示された。このような結果を音場評価手法の提案に結びつけるには、後期音の方向分布の基準化や LEV の適正範囲などの検討が必要であると考える。

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, 449-457 (1990)
- 2) J.S.Bradley and G.A.Soulodre, “Objective measures of listener envelopment,” J.Acoust. Soc. Am. 98(5), 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, 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, 9-16 (1999)
- 5) 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)
- 6) 比嘉規晶, 和久田晃子, 古屋浩, 藤本一寿, “後期音の到来方向が「音に包まれた感じ」に与える影響 (その 2),” 日本建築学会大会学術講演梗概集 (環境工学), 47-48 (2000.9)
- 7) 和久田晃子, 古屋浩, 藤本一寿, 穴井謙, “オーディトリウムにおける後期音の到来方向分布,” 都市・建築学研究 (九州大学大学院人間環境学研究院紀要) 1, 29-37 (2001.7)
- 8) 和久田晃子, 穴井謙, 藤本一寿, 古屋浩, “オーディトリウムにおける後期音の方向分布特性,” 日本音響学会講演論文集 2001 年秋, 1001-1002 (2001.10)