

コンサートホールにおける音に包まれた感じと方向別後期音エネルギー率の関係

磯谷 賢志

1. はじめに

聴衆が演奏を聴いてその音に満足できる音響的に優れたコンサートホールを設計するにはどうしたらいいのだろうか。これはホールの音響設計を担当する者が常に抱えている問題である。

聴衆を満足させられるコンサートホールの音響設計を行うには、ホールの容積や形状、壁面の材料などにより創りだされる室内音場の物理特性と、聴衆が感じる心理量との関係を明らかにすることが必要である¹⁾。

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、距離感や空間印象などの空間的属性、音の大きさや音色などの質的属性の大きく三つの属性に分けられる²⁾。それらの属性の中で空間的属性がホールの音場を評価する上で最も重要な要素の一つである。

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た³⁾⁴⁾⁵⁾。

空間印象は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である。空間印象には「みかけの音源の幅」(Apparent Source Width: ASW)と「音に包まれた感じ」(Listener Envelopment: LEV)の2つの要素があることが明らかにされている⁶⁾。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「み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、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⁴⁾、ASWに対する研究が数多くなされてきた。また、空間印象のもう一つの要素であるLEVに関しては1990年代中頃から側方から到来する後期音が関係していることが指摘され始め⁷⁾、研究も徐々に増え始めた。

一方、側方以外の方向から到来する後期音については、LEVに寄与しないとしてほとんど研究がなされなかった。しかし人間の耳が左右についていて、側方からの音を捕えやすいからとはいえ、側方以外から到来する音についても我々はその到来方向を知覚できているので、側方以外から到来する後期音についてもLEVに何らかの影響を与えているのではないだろうか。

このような考えから本研究室では、数年前から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の関係について検討してきた。

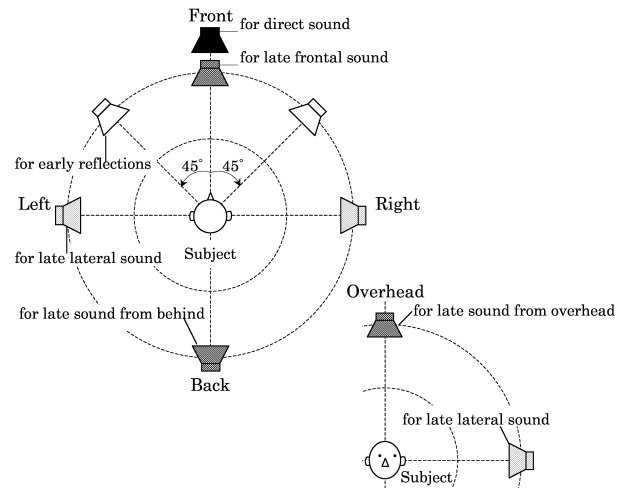


Fig.1 Arrangement of loudspeakers in an anechoic chamber.

その結果、側方後期音レベルに比べて寄与は小さいものの、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った⁸⁾⁹⁾。このことから、コンサートホール音場の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方向ごとに独立させて制御することは不可能である。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率が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。

本研究の目的は、音に包まれた感じと後期音エネルギー率の関係を心理実験により検討することである。

これまで本研究室で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との関係を検討することはできなかった。そこで本研究では、全後期音レベルを一定に設定した心理実験を行った。

2. 心理実験

後期音エネルギーの到来方向分布とLEVの関係を調べるために、全後期音レベルを一定(C_{80} を一定)として、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。

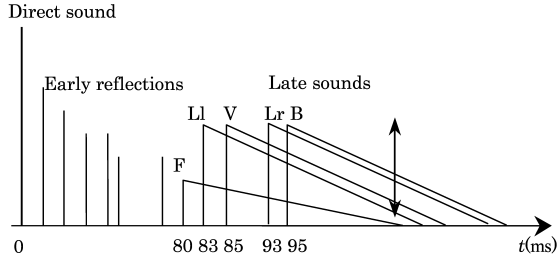


Fig.2 Signal configuration of the sound fields used in experiment (L=lateral, F=frontal, B=back and V=overhead).

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, 以下同様), 前方後期音エネルギー率 FE_{late} , 後方後期音エネルギー率 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。

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

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。

心理実験は、 C_{80} の値を -3dB, 0dB, +3dB の 3 段階に変化させそれぞれ行った (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、初期反射音並びに前方後期音エネルギー率 ($FE_{late} = 0.10$) は

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

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。

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¹⁰⁾¹¹⁾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。

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 とも同一人物である。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. 実験結果と重回帰分析

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。

3.1 実験結果

距離尺度の算出結果を **Fig.4** に示す。ここで **Table 1** を見てもらうと、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っていることがわかる。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 ($LE_{late} = 0.60$))

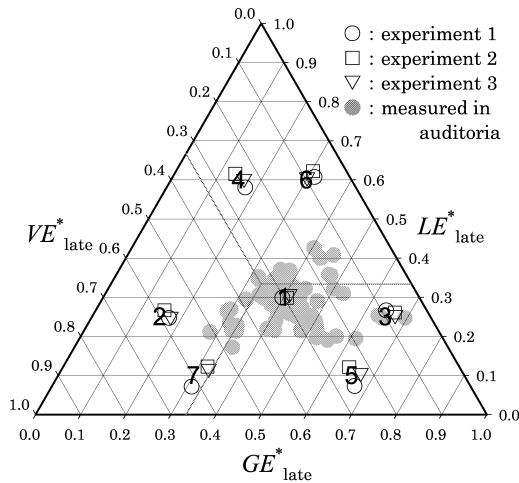


Fig.3 Distribution of directional late energy ratio used in experiment and measured in concert auditoria.

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。

3.2 重回帰分析

3.1 で確認された傾向を、各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、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 ($C_{80}=-3dB$) で 0.989、実験 2 ($C_{80}=0dB$) で 0.990、実験 3 ($C_{80}=+3dB$) 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

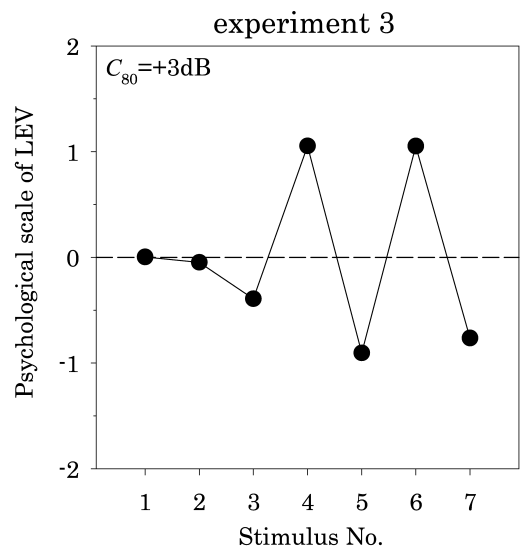
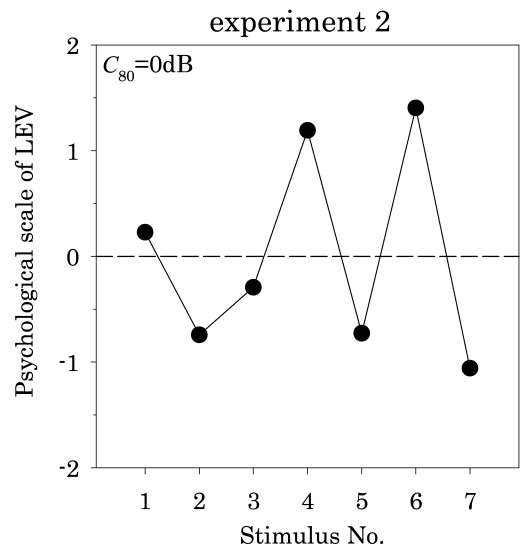
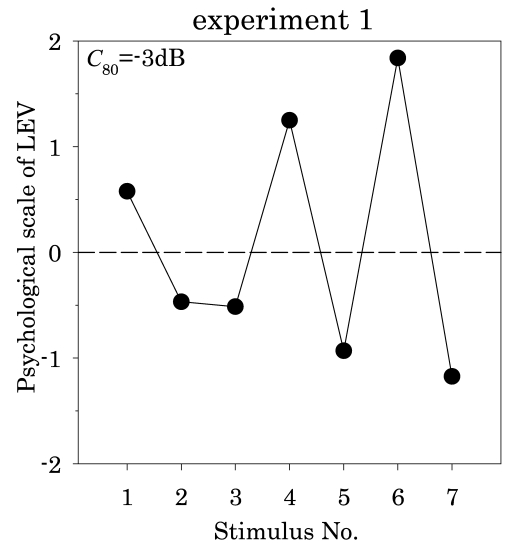


Fig.4 Psychological scale of LEV in three experiments.

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

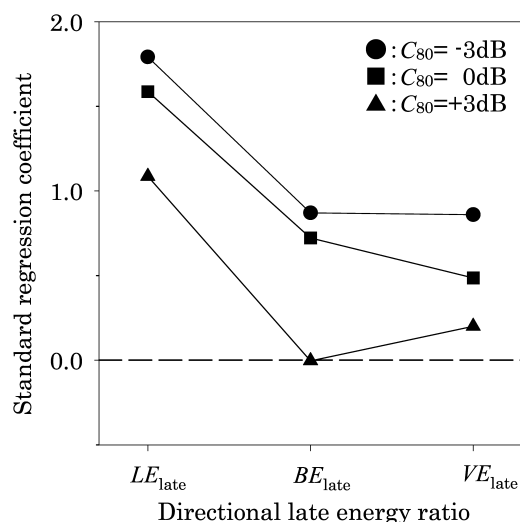


Fig.5 Standard regression coefficients for three directional late energy ratios.

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、 LE_{late} 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 LE_{late} 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. まとめ

本研究は聴衆が演奏を聴いて満足できるコンサートホールの音響設計法の確立を将来の目標に据えて、ホールにおいて音に包まれた感じと後期音エネルギー率の関係を検討してきた。

本研究は側方、後方、上方から到来する後期音と LEV の関係を検討する心理実験を行った。これまでに本研究室で行った心理実験では、全後期音レベルが一定ではなかったため、今回は全後期音レベルを一定に保った刺激音場を7つ設定し、それぞれの刺激において、側方、後方、上方からの後期音エネルギー率に注目し、こ

れを変化させた。さらに全後期音レベルを3段階に変化させ、同様の心理実験を行った。

その心理実験の結果、全後期音レベルの大きさにかかわらず、側方後期音エネルギー率は LEV に大きく影響することがわかった。後方及び上方の後期音エネルギー率については、 LEV への寄与は側方後期音エネルギー率よりも小さく後方、上方とも同じ程度であった。

また、全後期音レベルが小さいときには後方、上方の後期音エネルギー率はほとんど LEV に影響しないということがわかった。一方で全後期音レベルが大きい時には側方、後方、上方、いずれの方向からの後期音エネルギー率も LEV に寄与することが確認された。よって、全後期音レベルがある程度確保できる場合については、後方や上方からの後期音も無視できないということがわかった。

このような結果を踏まえて、今後はコンサートホール音場における後期音の到来方向分布を考慮した LEV の評価指標について検討する必要があると考える。しかし、ホールの音響を評価する心理量は LEV だけではない。よって LEV にだけとられることなく、ホールの音響設計において最も重要な点である室内音場の物理特性と聴衆が感じる心理量との関係を明らかにしていきたい。そして特定の要素だけに着目せず、すべての要素を考慮したより良いホールの音響設計法を模索していく必要がある。

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) 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) 比嘉規晶, 和久田晃子, 古谷浩, 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)
- 10) 和久田晃子, 古谷浩, 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)
- 11) 和久田晃子, 穴井謙, 藤本一寿, 古谷浩, “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)