

コンサートホールの客席における 後期音の方向情報と音に包まれた感じ

比嘉規晶

1. はじめに

コンサートホール音場の評価において重要な心理的要因の一つ“音に包まれた感じ (LEV)”は、側方から到来する反射音エネルギーの大きさに強く依存すると言われており、その評価指標として LG (後期側方反射音レベル) 等が提案されている。一方、側方以外からの反射音については、拡がり感には寄与しないとされ、ほとんど研究がなされていない。しかし、実音場では後期音は様々な方向から到来しており、後期音の方向性と LEV の関係を明らかにしておく必要がある。

そこで、筆者らはこれまで、横方向以外から到来する後期音を含む 3 次元的な模擬音場を用いて心理実験を行い、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、側方以外からの後期音にも LEV への影響があること、なかでも上方並びに後方からの後期音レベルに LEV と強い相関関係があること等を明らかにした。これらの結果は、側方反射音レベルだけに依存した物理指標では LEV を十分に説明できないことを意味しており、より有効な音響指標が確立される必要があると考えられる。

さて、後期音の特性を加味した音響指標を確立してゆくためには、実音場における後期音の特性を把握しておくことが必要不可欠であるが、実音場における後期音に関する測定データは全く見あたらない。

そこで、実際のホール音場における後期音のレベルや方向分布特性を明らかにするために、既存ホールにおいて音響測定を実施した。

2. 実音場測定の概要

2.1 測定方法

音源には 12 面体無指向性スピーカを、受信には、無指向性マイクロフォン、双指向性マイクロフォンを用いた。測定は、音源スピーカから短音(時間幅 $40\mu\text{s}$)を発生し、同期加算法により時間応答波形を観測した。

2.2 対象ホール

測定は、Hall A,B(多目的ホール)と Hall C,D(コンサートホール)の計 4 ホールにおいて行った。Hall A は 2 階席を有する一般的な多目的ホール、Hall B はワンフロアの扇形ホール、Hall C,D はいずれもシューボックス型ホールである。測定点は、Hall A : 10 点(1 階 6 点, 2 階 4 点)、Hall B : 12 点(1 階 12 点)、Hall C : 16 点(1 階 8 点, 2 階 4 点, 3 階 4 点)、並びに Hall D : 16 点(1 階 8 点, 2 階 2 点, 3 階 6 点)とした。各ホールの音響諸元と断面図をそれぞれ Table 1 と Fig.1 に示す。

Table 1 Acoustical outline of surveyed halls.

Hall name	Seats	V(m ³)	V/S(m)	RT(s)	$\bar{\alpha}$
A	1,522	12,167	2.60	1.59	0.23
B	1,780	13,994	3.36	1.45	0.31
C	1,871	17,445	2.51	2.24	0.17
D	1,818	17,302	2.80	1.79	0.22

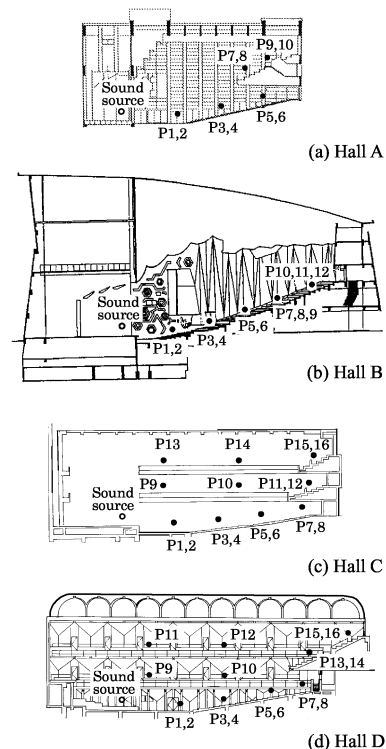


Fig.1 Sectional plan of surveyed halls.

2.3 後期音に関する物理指標

無指向性および双指向性マイクロフォンの出力波形から、Strength G 、後期音レベル G_{late} (late : $t = 80 \sim \infty\text{ms}$, 以下同様)、並びに、後期音エネルギーの方向情報を規定する物理量として、3つの方向別後期音レベル、 GG_{late} (後期前後反射音レベル)、 LG_{late} (後期側方反射音レベル)、 VG_{late} (後期鉛直反射音レベル)、および3つの方向別後期音エネルギー率として、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 GE_{late} 、 LE_{late} 、 VE_{late} を各々算出した。

ここで、双指向性マイクロフォンは指向軸を前後、左右、上下方向に向けて使用されている。

3. 測定結果

3.1 多目的ホール

Hall A,Bにおける後期音レベルに関する結果を Fig.2 と Fig.3 に示す (250~4kHz(1/1 oct. band 幅)、および平均値)。まず、Hall A について見てみると、バルコニー下の測定点 5,6 において後期音レベル G_{late} が低下しているのがわかる。方向別後期音レベルについてもほぼ同様の傾向であるが、特に VG_{late} における落ち込みが顕著である。バルコニー下以外の測定点では、各方向とも同程度の値を示している。これらの結果は、周波数によらずほぼ同様の傾向である。また、測定値の変化幅(周波数平均値)としては、 GG_{late} が 4.3dB(-7.0~-2.7dB)、 LG_{late} が 5.9dB(-9.5~-3.6dB)、 VG_{late} が 8.4dB(-12.3~-3.9dB) である。

次に、Hall B について見てみる。測定点 1~9 における VG_{late} は GG_{late} , LG_{late} に比べ約 2dB 大きい値を示しているが、逆に後壁に近い測定点 10,11,12 になると VG_{late} が極端に小さくなっていることがわかる。すなわち、方向別後期音レベルのバランスが測定点によって大きく変化しており、このことは Hall B の一つの特徴と言える。測定値の変化幅は、 GG_{late} が 4.9dB (-7.7~-2.8dB)、 LG_{late} が 8.7dB(-12.3~-3.6dB)、 VG_{late} が 17.6dB(-18.9~-1.3dB) である。

3.2 コンサートホール

Hall C,D における結果を Fig.4 と Fig.5 に示す。まず、Hall C については、 GG_{late} , LG_{late} , VG_{late} ともにほぼ同様の傾向を示しており、1 階席(測定点 1~8)、2 階席(測定点 9~12)、3 階席(測定点 13~16)の各フロアごとに音源からの距離が増加するにつれて値が減少している様子がわかる。ただし、1 階席後方の測定点 7,8 においては、バルコニーの影響により VG_{late} の低下が著しい。測定値の変化幅は、 GG_{late} が 3.5dB (-3.2~0.3dB)、 LG_{late} が 4.7dB(-5.2~-0.5dB)、 VG_{late} が 6.8dB(-7.0~-0.2dB) であり、前述の Hall A,B に比べて小さい。

次に、Hall D について見てみる。Hall D は、周波数によるばらつきが大きいことを除けば Hall C と同様の傾向にある。測定値の変化幅は GG_{late} が 3.4 dB (-3.4~0.0dB)、 LG_{late} が 5.0dB (-4.5~0.5dB)、 VG_{late} が 5.5dB(-5.4~0.1dB) である。

3.3 周波数特性

G , G_{late} , GG_{late} , LG_{late} , VG_{late} の周波数特性(場内平均値)をホールごとに Fig.6 に示す。Hall A において 250Hz 帯域が、Hall D において 2k~4kHz 帯域の値が各々盛り上がっているのがわかる。他のホールについては周波数特性上の大きな山谷は見られない。

また、Hall A の VG_{late} および Hall B の LG_{late} , VG_{late} において、各周波数ともに測定点間のばらつきが大きくなっているのがわかる。これは、バルコニーおよび扇形形状に起因するものと考えられる。Hall C,D については、測定点による値のばらつきは少なく全ての周波数でほぼ同程度である。

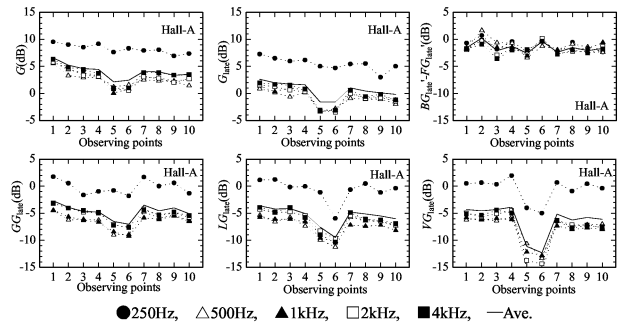


Fig.2 Acoustical parameters of late sound measured at five octave-bands in Hall A.

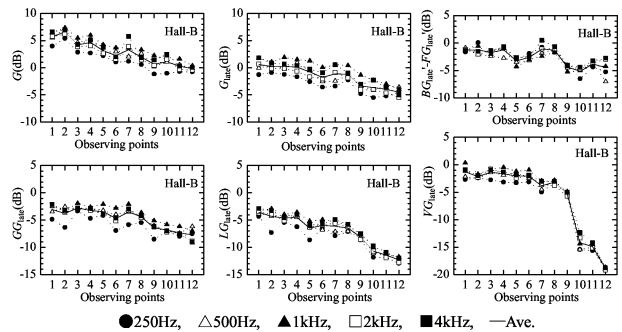


Fig.3 Acoustical parameters of late sound measured at five octave-bands in Hall B.

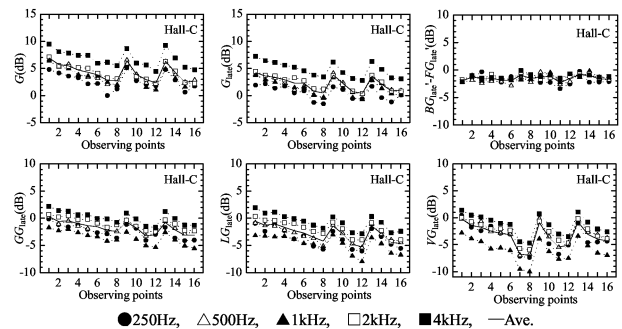


Fig.4 Acoustical parameters of late sound measured at five octave-bands in Hall C.

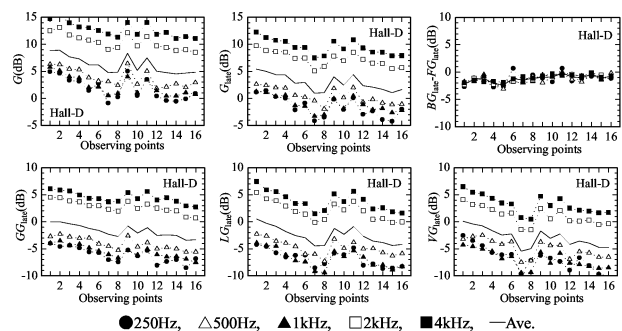


Fig.5 Acoustical parameters of late sound measured at five octave-bands in Hall D.

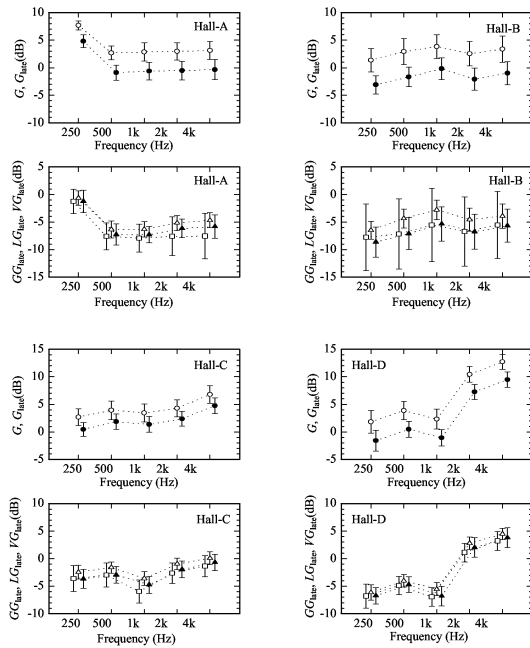


Fig.6 Frequency characteristics of acoustical parameters, Mean value averaged over all the observation points and the standard deviation, $:G$, $:G_{late}$, $:GG_{late}$, $:LG_{late}$, $:VG_{late}$.

4. 後期音レベルに関する考察

4.1 後期音のレベル分布

G , G_{late} , GG_{late} , LG_{late} , VG_{late} (周波数平均値) の距離減衰特性を見ている。音圧レベルの距離減衰特性に関しては、Barron が、“音圧レベルの距離減衰量は音場の拡散性に依存する”ことを提案している。この観点から、上記5つのレベル量に関する減衰率 m (dB/10m) をホールごとに算出してみた。結果を Table 2 に示す。

Table 2 Level attenuation of directional late sound level.

Hall	Level attenuation coefficient m (dB/10m)				
	G	G_{late}	GG_{late}	LG_{late}	VG_{late}
A	2.0	2.1	1.4	2.1	2.8
B	2.3	1.9	1.8	3.0	5.7
C	1.7	1.5	1.2	1.7	2.1
D	1.7	1.5	1.2	1.7	1.7

まず G , G_{late} に関しては、Hall A,B と Hall C,D を比較すると前者の方がデッドなため減衰量は大きく、これは Barron の知見と一致している。

次に、後期音の方向成分ごとの減衰率 m に着目してみると、いずれのホールも VG_{late} , LG_{late} , GG_{late} の順に減衰率 m が大きいことがわかる。特に、鉛直方向成分の減衰率が大きいのは一般的に客席吸音面の効果と考えられる。また、Hall A,B と Hall C,D を比較してみると、 GG_{late} で両者の差は平均 0.3, LG_{late} では 0.9, VG_{late} では 2.4 とその差は大きくなっている。す

なわち、Hall A,B(特に Hall B) は、Hall C,D と比べ後期音の鉛直成分の減衰が著しく大きく、方向成分間のばらつきが大きい。言い換えると、Hall C,D は拡散性の高い音場であるとも言える。このように、方向別のレベル分布から、音場の拡散性に関する詳細な情報を得ることができるものと考えられる。

4.2 後期音レベルの変化幅

G , G_{late} , GG_{late} , LG_{late} , VG_{late} (周波数平均値) の場内平均値、最大値、最小値並びに最大値と最小値の差を、Hall A,B と Hall C,D に分けて Table 3 に示す。

G の変化幅は、ホールに依らず約 7dB であるが、方向別後期音レベルの変化幅は、Hall A,B で 5.0 ~ 17.5dB、Hall C,D で 3.7 ~ 7.1dB であり、後者の方が明らかに小さい。また、いずれのホールも前後方向成分の変化幅が最小で (3.7 ~ 5.0dB)、鉛直方向成分の変化幅が最大である (7.1 ~ 17.5dB)。これらの結果は、音響心理実験における模擬音場の条件設定のための有用なデータとなるものである。

Table 3 Range of measured values.

(a) Multi-purpose hall (Hall A, B)

	Average (dB)	Minimum (dB)	Maximum (dB)	Max.-Min. (dB)
G	3.4	-0.2	6.6	6.8
G_{late}	-0.6	-4.5	2.6	7.1
GG_{late}	-4.7	-7.7	-2.7	5.0
LG_{late}	-6.4	-12.3	-3.6	8.7
VG_{late}	-6.1	-18.8	-1.3	17.5

(b) Shoebox-type concert hall (Hall C, D)

	Average (dB)	Minimum (dB)	Maximum (dB)	Max.-Min. (dB)
G	5.2	2.4	8.9	6.6
G_{late}	2.5	0.4	5.4	5.0
GG_{late}	-1.7	-3.4	0.3	3.7
LG_{late}	-2.6	-5.2	0.5	5.7
VG_{late}	-3.1	-7.0	0.1	7.1

5. 物理量相互の関係

後期音の性状を把握していくためには、物理量相互の基本的な関係について調べておく必要があるため、今回定義した方向別後期音レベル GG_{late} , LG_{late} , VG_{late} や方向別後期音エネルギー率 GE_{late} , LE_{late} , VE_{late} について、それらの相関関係について考察を加えた。

5.1 G_{late} と方向別物理量

後期音レベル G_{late} と方向別後期音指標との相関係数を Table 4 に示す。 G_{late} と方向別後期音レベル (GG_{late} , LG_{late} , VG_{late}) の間には、当然高い相関があることが予想されるが、相関係数の値からもそのことが確認できる (いずれも 0.85 以上)。

一方、 G_{late} と方向別後期音エネルギー率 (GE_{late} , LE_{late} , VE_{late}) は全体として相関は低いが、 G_{late} と GE_{late} の間に負の相関が見られる。これは、後期音エネルギーの大小は側方や鉛直方向エネルギーに依存し、前後方向エネルギーは関係しないことを表している。この傾向は Hall C,D において特に顕著である。

Table 4 Correlation coefficients between G_{late} and directional late energy indices. (**, $p < 0.01$; *, $p < 0.05$)

Hall	G	Directional late energy level		
		GG_{late}	LG_{late}	VG_{late}
A	0.96**	0.85**	0.93**	0.91**
B	0.94**	0.97**	0.96**	0.89**
C	0.98**	0.95**	0.96**	0.94**
D	0.95**	0.94**	0.98**	0.96**
4Halls	0.90**	0.92**	0.96**	0.76**

Hall	Directional late energy ratio		
	GE_{late}	LE_{late}	VE_{late}
A	-0.42	0.24	0.60
B	-0.18	0.77**	0.72**
C	-0.59*	0.41	0.73**
D	-0.73**	0.16	0.31
4Halls	-0.54**	0.34*	-0.11

6. 後期音の方向分布に関する考察

後期音の特性と LEV との関係性を明らかにするには、実音場における後期音の空間的なバランスを明らかにしておく必要がある。そこで、方向別後期音エネルギー GE_{late} , LE_{late} , VE_{late} を合計が 1.0 になるよう補正した方向別後期音エネルギー比 GE_{late}^* , LE_{late}^* , VE_{late}^* を算出し、これらを用いて後期音の方向分布について考察する。周波数ごとの GE_{late}^* , LE_{late}^* , VE_{late}^* の散布図、周波数平均値の散布図を、Fig.7, Fig.8 に示す。また、後期音エネルギーの空間バランスを見るため、3次元直交座標系における点 (GE_{late}^* , LE_{late}^* , VE_{late}^*) と前後・左右・鉛直方向から均等に後期音エネルギーが到来する点 ($1/3, 1/3, 1/3$) の距離の空間平均値 \bar{d}_{late} を定義した。 \bar{d}_{late} をホールごとに Table 5 に示す。

まず周波数別に見ると、周波数が高いほど各観測点の値が ($1/3, 1/3, 1/3$) 点に集中しているのがわかる。すなわち、高音域になるほど後期音は均等に到来し、低音域では到来方向に偏りがあることを示している。このことは、一般に高音域に比べ低音域の拡散性が低いことと符合する。また、Hall B では全帯域に渡ってばらつきが大きい、Hall C, D では、低音域におけるばらつきが高音域になると次第に減少し方向別エネルギーの分布が均等になっていることがわかる。

次に、周波数平均値について見てみる。Hall B は側方

Table 5 Mean distance \bar{d}_{late} between (GE_{late}^* , LE_{late}^* , VE_{late}^*) and ($1/3, 1/3, 1/3$).

Hall	$\bar{d}_{late}(10^{-2})$					
	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	Ave.
A	1.5	1.0	1.1	2.0	2.7	1.4
B	6.5	5.6	5.8	4.8	3.9	5.2
C	1.3	1.3	1.8	1.1	0.9	1.1
D	0.7	0.6	1.1	1.1	0.5	0.7

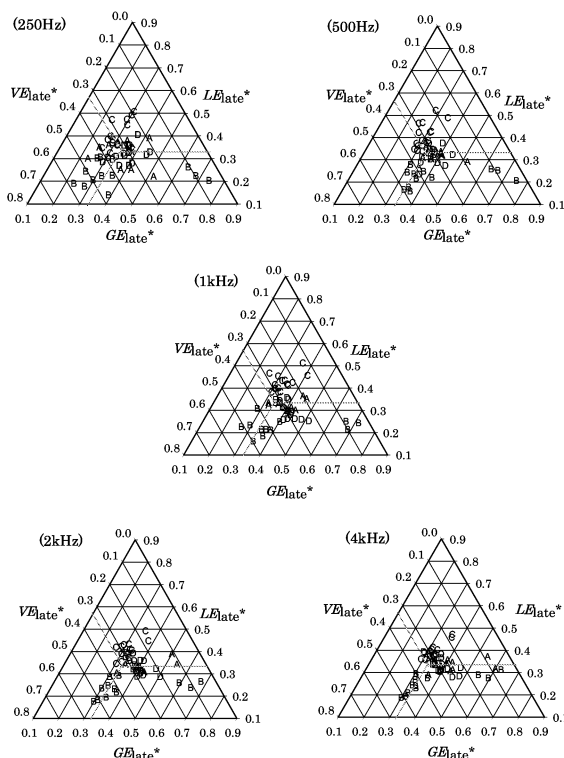


Fig.7 Normalized directional late energy ratio at five frequency-bands.

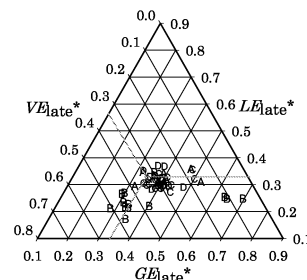


Fig.8 Normalized directional late energy ratio. (averaged over five frequency-bands)

エネルギー比が低く、観測点間のばらつきも大きい。これはホールの扇形形状に起因するものと考えられる。一方、Hall D では後期音エネルギー比の分布は集中しており場所によるばらつきは小さい。また、Hall A と Hall C のバルコニー下の観測点、Hall B の最後部観測点では明らかに鉛直方向エネルギー比が低い。 \bar{d}_{late} (10^{-2}) の値は、Hall B で 5.2 と最も大きく、Hall D で 0.7 と最も小さい。

7. 結論

ホール実測により、実音場における後期音の方向特性について検討を行い、方向別後期音レベルの変化幅の値等、具体的なデータを得ることができた。また、方向別後期音レベルの距離減衰特性並びに到来方向の分布特性について考察した結果、音場の拡散性を強く反映する点からも、後期音の方向分布特性がホール音場を評価するうえで重要な指標となることが示唆された。