

実音場における後期音の方向分布特性

山口周平

1. はじめに

我々の研究室ではこれまでに側方向以外から到来する後期音を含む3次元的な音場を作り音響心理実験を行った。そして、後期音の到来方向とLEVの関係について検討を行った結果、LEVは側方向反射音のレベルに最も依存するものの後方並びに上方から到来する後期音にも強い相関関係があることを明らかにしてきた。

側方反射音の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と考え、LEVをより有益な指標とする為にも全体の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検討する必要があると判断した。

また、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、実際のコンサートホール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。しかしながら、これまでコンサートホールにおける後期音の特性は、ほとんど研究されておらず実測データも全くないのである。

そこで本論文では実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実在するコンサートホールにおいて音響測定を実施したので、その結果をまとめた。

2. 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、受音には、無指向性マイクロフォン、双指向性マイクロフォンおよび単一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、2つの多目的ホール(Hall A,B)と2つのコンサートホール(Hall C,D)の計4つの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であり4つのホールの中では最もデッドなホールである。2つのコンサートホールは、いずれも2,3階サイドバルコニー席を有する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。ホールの音響諸元と断面図をTable-1とFig-1に各々示す。

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

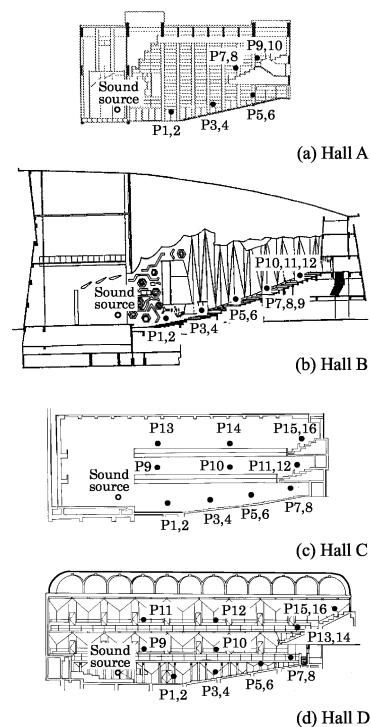


Fig-1 Sectional plans of surveyed halls.

2.3 後期音に関する物理量

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} ($late : t=80\sim$ 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と3つの方向別後期音エネルギー率を各々算出した。また、前後方向から到来する反射音エネルギーに関しては、LEVに対する影響が前方反射音と後方反射音とで異なることから、本稿では後期音エネルギーの前方成分と後方成分の差を把握するために、単一指向性マイクロフォンによる測定も併せて行った。

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)。

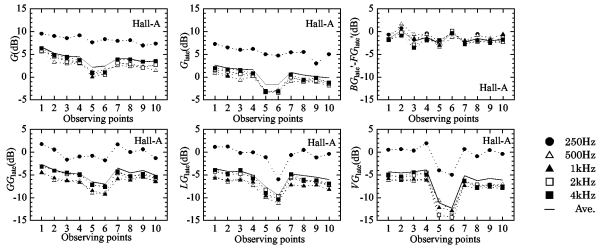


Fig-2 Acoustical parameters of late sound measured at five octave-bands in Hall A.

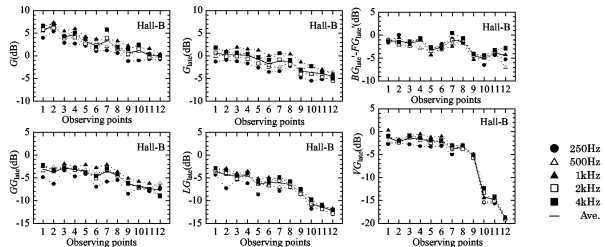


Fig-3 Acoustical parameters of late sound measured at five octave-bands in Hall B.

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 $V_{G_{late}}$ 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 $V_{G_{late}}$ 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 $V_{G_{late}}$ 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 4.9 dB (-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。また、後期前方反射音レベルの方が後期後方反射音レベルより 1~5dB 程度大きい。

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) および 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 $V_{G_{late}}$ 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。

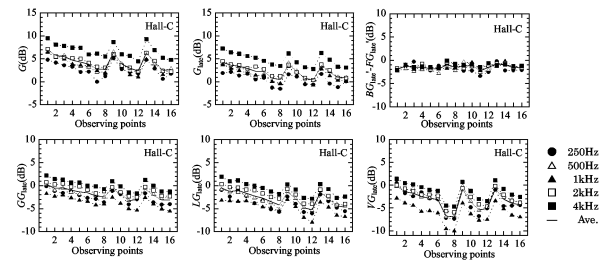


Fig-4 Acoustical parameters of late sound measured at five octave-bands in Hall C.

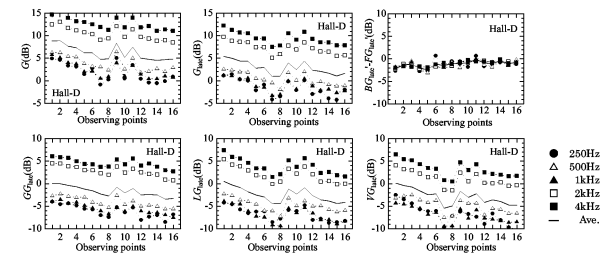


Fig-5 Acoustical parameters of late sound measured at five octave-bands in Hall D.

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 $V_{G_{late}}$ および Hall B の LG_{late} , $V_{G_{late}}$ 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。

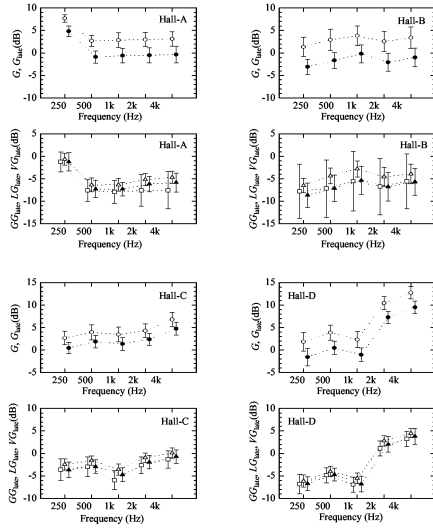


Fig-6 Frequency characteristics of G , G_{late} , GG_{late} , LG_{late} and VG_{late} in each hall; Mean value averaged over all observation points and the standard deviation, $\circ G$, $\circ G_{late}$, $\circ GG_{late}$, $\circ LG_{late}$, $\circ VG_{late}$.

4. 後期音レベルに関する考察

4.1 後期音のレベル分布

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。

まず G , G_{late} に関しては、Hall A,B(多目的ホール)と Hall C,D(コンサートホール) 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。まず、いずれのホールも VG_{late} , LG_{late} , GG_{late} の順に m は大きく、前後方向成分に比べて鉛直方向および側方成分の減衰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(多目的ホール)と Hall C,D(コンサートホール) を比較してみると、 GG_{late} で両者の差は平均 0.3 と小さいのに対して、 LG_{late} では 0.9, VG_{late} では 2.4 と顕著にその差は大きくなっている。すなわち、今回測定した多目的ホール(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、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、多目的ホールとコンサートホールに分けて 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(多目的ホール)

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

Table- 3 Range of measured values on late sound.

(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

で 5.0 ~ 17.5dB、Hall C,D(コンサートホール) 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あり (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。

5. 物理量相互の関係

後期音の性状を的確に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。そこで、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} といった物理量について、それらの相関関係について基礎的な考察を加えた。

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関係を調べた。各物理量間の相関係数を 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

一方、 G_{late} と方向別後期音エネルギー率 (GE_{late} , LE_{late} , VE_{late}) の関係を見ると、全体として相関は低いと言える。ただし、特徴的な点は、 G_{late} と前後方向エネルギー率 GE_{late} との間には負の相関が見られることである。すなわち、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ており、前後方向エネルギーは関係しないと言う事を表している。この傾向は Hall C,D(コンサートホール) 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していくためには、後期音の到来方向に関する空間的なバランスを明らかにしておかなければならない。そこで、3つの方向別後期音エネルギー率 GE_{late} , LE_{late} , VE_{late} を合計が 1.0 になるように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、以下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、および周波数平均値の散布図を、Fig-7 と Fig-8 に各々示す。また、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場合、 GE_{late}^* , LE_{late}^* , VE_{late}^* の各値は 1/3 となることから、後期音エネルギーの到来方向に関する空間バランスを見るための指標として、3次元直交座標系における点 (GE_{late}^* , LE_{late}^* , VE_{late}^*) と点 (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} の算出結果をホールごとに 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。つまり、高音域になるほどあらゆる方向から均等に後期音エネルギーが到来しており、逆に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、ホール別に見てみると、Hall B(多目的ホール)では全帯域に渡ってばらつきが大きいのが、Hall C,D(コンサートホール)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(多目的ホール)で 5.2 と最も大きく、Hall D(コンサートホール)で 0.7 と最も小さい。

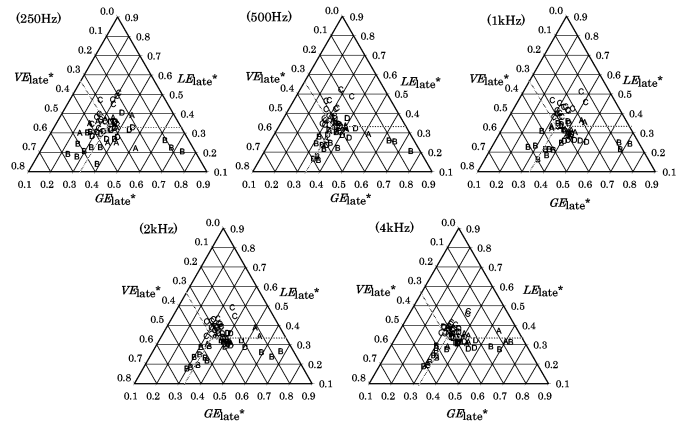


Fig-7 Normalized directional late energy ratio at five frequency-bands; The letters mean the name of hall.

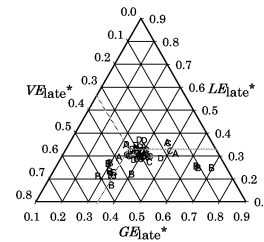


Fig-8 Normalized directional late energy ratio. (averaged over five frequency-bands)

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

Hall	$\bar{d}_{late}(10^{-2})$					Ave.
	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	
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

7. むすび

ホール音場の実測により、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、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。