

オーディトリウムにおける後期音の到来方向分布

和久田, 晃子
九州大学大学院人間環境学府空間システム専攻修士課程

古屋, 浩
九州共立大学

藤本, 一壽
九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門

穴井, 謙
九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門

<https://doi.org/10.15017/19009>

出版情報：都市・建築学研究. 1, pp.29-37, 2001-07-25. 九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門
バージョン：
権利関係：

オーデトリウムにおける後期音の到来方向分布

Directional Distribution of Late Sounds in Concert Auditoria

和久田晃子*, 古屋 浩**, 藤本一壽***, 穴井 謙***

Akiko WAKUDA, Hiroshi FURUYA, Kazutoshi FUJIMOTO
and Ken ANAI

Directional late sounds are measured in two multi-purpose halls and two shoe-box type concert halls and the directional characteristics including distribution of late sound level and the correlation of physical indices are considered. The results show that in multi-purpose halls the average values of longitudinal, lateral and vertical late sounds level are -5dB, -6dB and -6dB respectively and in concert halls they are -2dB, -3dB and -3dB. It is also found that the directional late sound levels decrease with the increase of source-receiver distance and they correlate strongly with overall late sound level. To try to express directional late sounds observed by listener, a triangular coordinate based on the normalized directional late energy ratios is introduced. It shows that the directional late sounds are equally distributed in the field of high frequency.

Keywords : Concert hall acoustics, Listener envelopment, Directional late sounds, Hall measurement
コンサートホール音響, 音に包まれた感じ, 後期音の方向特性, 音場実測

1. はじめに

コンサートホール音場の評価における重要な心理的要因に“拡がり感”があり、これは見かけの音源の幅 (ASW, Apparent Source Width) と音に包まれた感じ (LEV, Listener Envelopment) の2つの側面で捉えることができるとされている。このうち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、その評価のための物理指標として、後期側方反射音の絶対レベルに着目した LG^1 等が提案されている。一方、実際のコンサートホールでは、横方向以外の方向から到来する反射音も多く存在していると考えられるが、このような反射音については、両耳入力波形の相関度に基礎を置く考えから“拡がり感”には寄与しないとされ、これまでほとんど研究がなされていない。

筆者らは、横方向以外の方向から到来する反射音も“拡がり感”に関係があるのではないかという考えから、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た心理実験を行ない、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、後期側方

反射音レベルを一定とした条件下で側方以外の方向から後期音を付加することによってLEVに有意な差が生じること、また到来方向別に後期音レベルを変化させた実験から、側方反射音レベルだけでなく上方並びに後方から到来する後期音レベルもLEVと強い相関関係があること等を明らかにしてきた²⁾³⁾。これらの結果は、側方反射音レベルだけに基づいた物理指標ではLEVを十分に説明できないことを意味しており、LEVを制御するためには、全体の聴取音圧レベルとともにさまざまな方向から到来する後期音レベル或いはそれらの割合等も配慮する必要があると考えられる。

後期音の特性を考慮した有効な音響指標を確立してゆくためには、実際の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。しかしながら、実音場における後期音の特性については、これまでほとんど研究されておらず測定データも全く見あたらない。

そこで本研究では、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。本稿ではその結果について報告する。

2. 音場測定の概要

2.1 測定方法

測定装置のシステムブロックをFig.1に示す。測定装

* 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

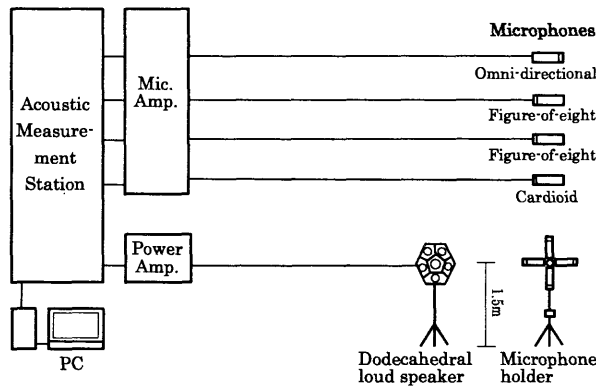


Fig.1 Block diagram of measurement.

置の音源には 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および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、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。Hall C, D 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コンサートホールである。

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.2 に各々示す。

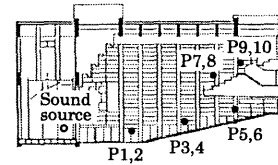
2.3 後期音に関する物理量

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} ($\text{late} : t = 80 \sim \infty \text{ms}$, 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と 3つの方向別後期音エネルギーを各々算出した。方向別後期音レベルは Bradley の LG に倣い、後期前後反射音レベル GG_{late} 、後期側方反射音レベル LG_{late} および後期鉛直反射音レベル VG_{late} を (1) 式により定義した。また、方向別後期音エネルギーは、各方向成分エネルギーの全後期音エネルギーに対する割合として GE_{late} , LE_{late} , VE_{late} を (2) 式により定義した。

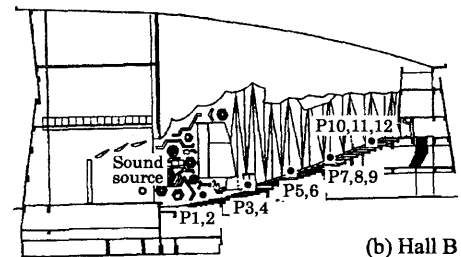
$$\begin{aligned}
 GG_{\text{late}} &= 10 \log \left\{ \int_{80}^{\infty} p_{\infty G}^2(t) dt / \int_0^{\Delta t} p_A^2(t) dt \right\}, \text{ dB} \\
 LG_{\text{late}} &= 10 \log \left\{ \int_{80}^{\infty} p_{\infty L}^2(t) dt / \int_0^{\Delta t} p_A^2(t) dt \right\}, \text{ dB} \quad (1) \\
 VG_{\text{late}} &= 10 \log \left\{ \int_{80}^{\infty} p_{\infty V}^2(t) dt / \int_0^{\Delta t} p_A^2(t) dt \right\}, \text{ dB}
 \end{aligned}$$

Table 1 Acoustical outline of surveyed halls.

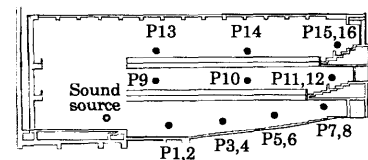
Hall name	Seats	$V(\text{m}^3)$	$V/S(\text{m})$	$RT(\text{s})$	$\bar{\alpha}$
A	1,522	12,167	2.60	1.59	0.23
B	1,780	13,994	3.36	1.45	0.31
C	1,871	17,445	2.51	2.24	0.17
D	1,818	17,302	2.80	1.79	0.22



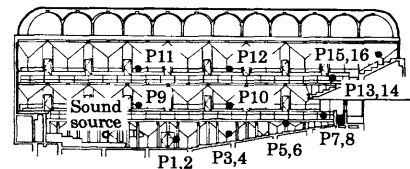
(a) Hall A



(b) Hall B



(c) Hall C



(d) Hall D

Fig.2 Sectional plan of surveyed halls.

$$\begin{aligned}
 GE_{\text{late}} &= \int_{80}^{\infty} p_{\infty G}^2(t) dt / \int_{80}^{\infty} p^2(t) dt \\
 LE_{\text{late}} &= \int_{80}^{\infty} p_{\infty L}^2(t) dt / \int_{80}^{\infty} p^2(t) dt \\
 VE_{\text{late}} &= \int_{80}^{\infty} p_{\infty V}^2(t) dt / \int_{80}^{\infty} p^2(t) dt
 \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、(1) 式における $p_{\infty G}(t)$, $p_{\infty L}(t)$, $p_{\infty V}(t)$ は各々、双指向性マイクロフォンの指向軸を前後、左右、上下方向に向けて得られる音圧を、また $p_A(t)$ は、音源からの距離が 10m の観測点における直接波の音圧を表す。また Δt は、最初の反射音が到来する前までの時間を表す。(2) 式における $p(t)$ は、無指向性マイクロフォンの出力音圧を表す。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

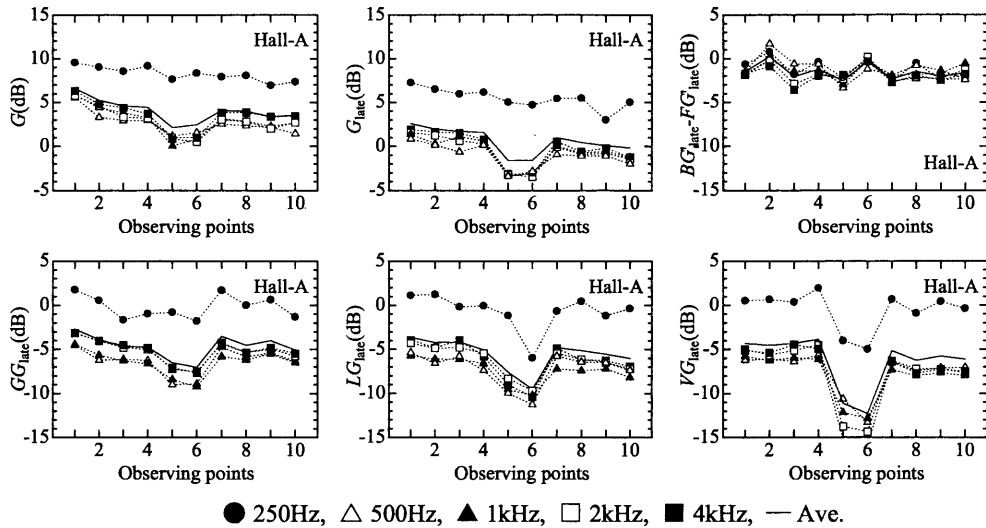


Fig.3 Acoustical parameters of late sound measured at five octave-bands in Hall A.

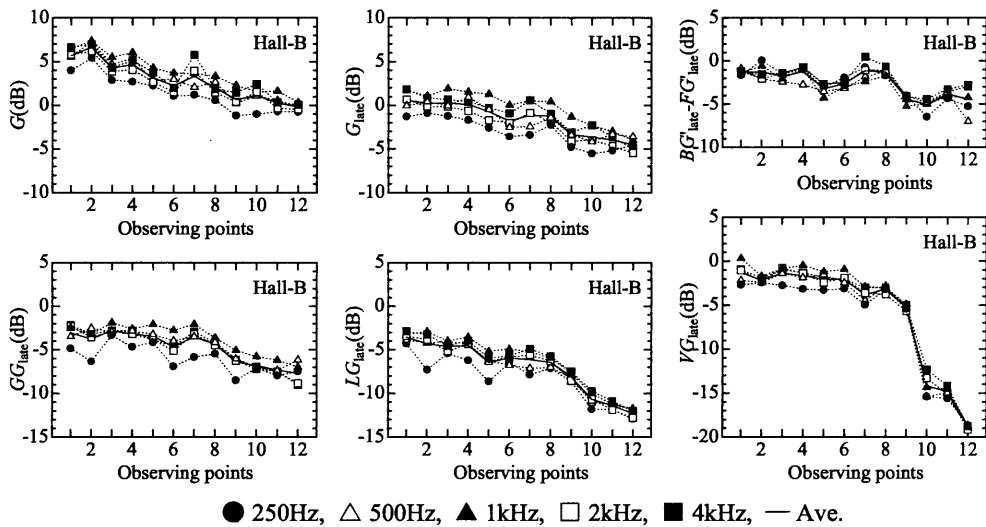


Fig.4 Acoustical parameters of late sound measured at five octave-bands in Hall B.

異なることから³⁾⁴⁾、後期音エネルギーの前方成分と後方成分を分けて把握するために、単一指向性マイクロフォンによる測定も併せて行った。すなわち、単一指向性マイクロフォンの指向軸を前方向および後方向に向けて得られる音圧から、後期前方反射音レベル FG'_{late} 並びに後期後方反射音レベル BG'_{late} を (1) 式と同様に定義し、算出した。

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.3 と Fig.4 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、周波数に依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。図中には、 $BG'_{late} - FG'_{late}$ を併せて示しているが、これより後期前方反射音レベルの方が後期後方反射音レベルに比べて 0~3dB 程度大きい値を示しているのがわかる。

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)、

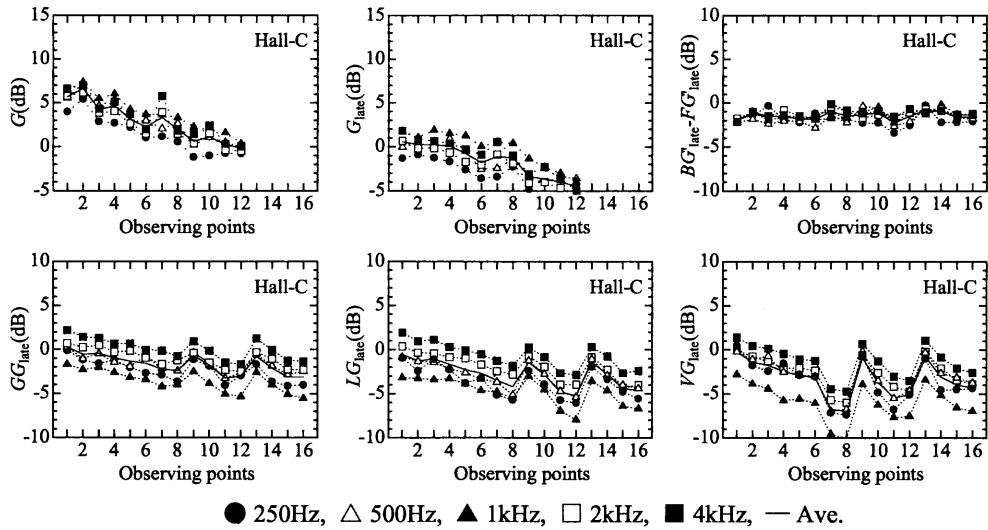


Fig.5 Acoustical parameters of late sound measured at five octave-bands in Hall C.

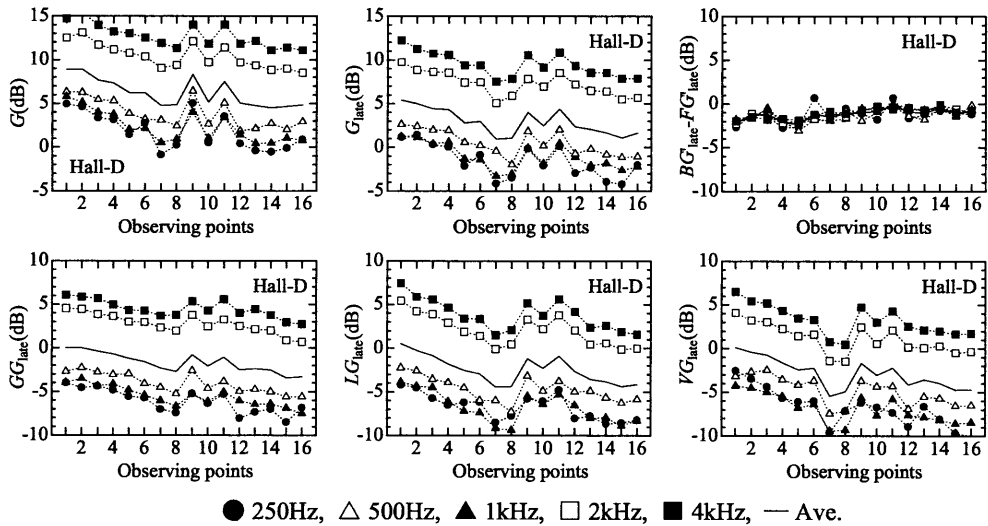


Fig.6 Acoustical parameters of late sound measured at five octave-bands in Hall D.

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.5 と Fig.6 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 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。また、後期前方反射音レベルは後期後方反射音レベルより 1~

2dB 大きい。

次に、Hall D について見てみる。Hall D も、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。後期前方反射音レベルは後期後方反射音レベルより 0~2dB 程度大きい。

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.7 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

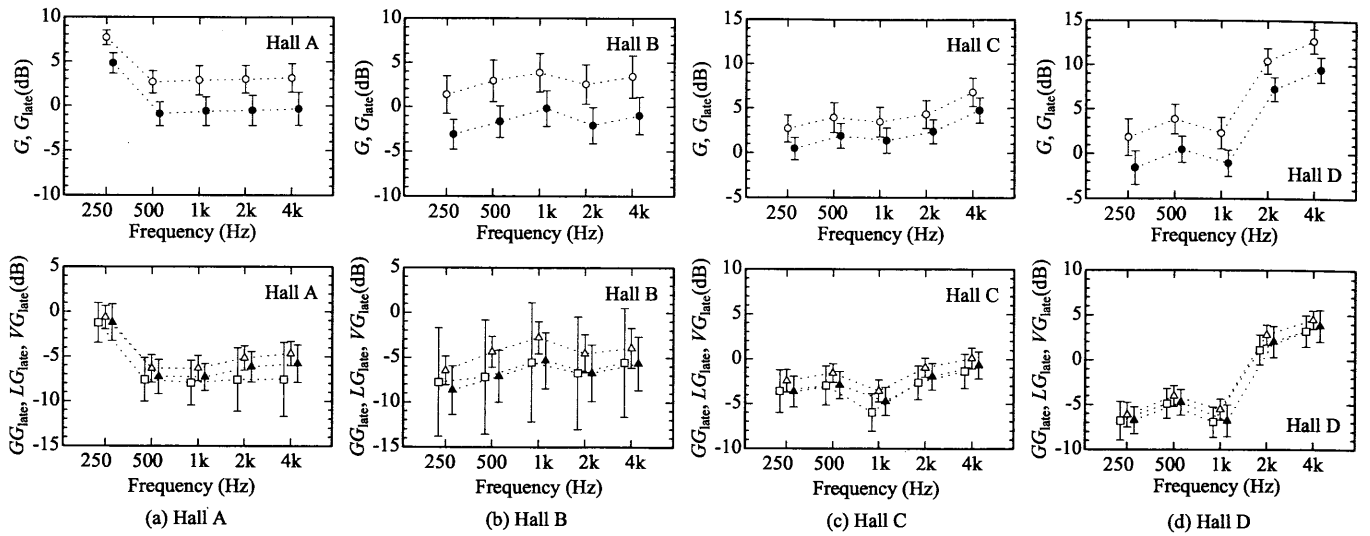


Fig.7 Frequency characteristics of acoustical parameters, Mean value averaged over all the observation points and the standard deviation, O: G , ●: G_{late} , △: GG_{late} , ▲: LG_{late} , □: VG_{late} .

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。

4. 後期音レベルに関する考察

4.1 後期音レベルの変化幅

結果を Table 2 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)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。

4.2 後期音の距離減衰特性

G , G_{late} 並びに方向別後期音レベル GG_{late} , LG_{late} , VG_{late} (周波数平均値)の距離減衰特性を、ホールごとの回帰直線とともに Fig.8 に示す。音圧レベルの距離減衰特性に関しては、Barron⁵⁾⁶⁾が、室の完全拡散を前提とする従来の理論に対して、“音圧レベルの距離減衰量は音場の拡散性に依存する”として、いわゆる Revised theory を提案しているが、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 3 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 の報告と符合している。

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 m は VG_{late} , LG_{late} , GG_{late} の順に大きく、前後方向成分に比べて鉛直方向および側方成

Table 2 Range of measured values on late sounds.

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

	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) Hall C, D (Shoobox-type concert hall)

	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

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。すなわち、Hall C, D は、方向ごとの拡散性が均等な音場であると言える。このように、方向別の後期音レベル分布から、音場の拡散性に関する詳細な情報を得ることができると考えられる。

4.3 前方成分と後方成分のレベル差

後期音エネルギーの後方/前方レベル差 ($BG'_{late} - FG'_{late}$) を 4 ホールまとめて Fig.9 に示す。また、比較のために初

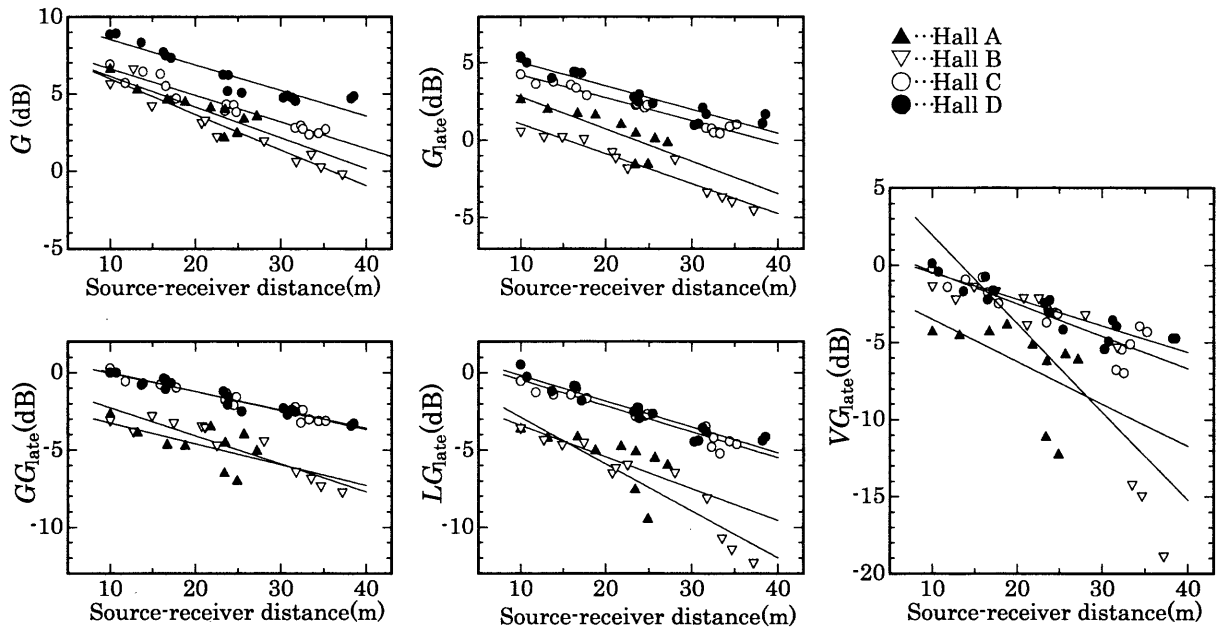


Fig.8 Directional late sound level as a function of source-receiver distance in 4 halls. (points and solid least-squares fit line)

Table 3 Level attenuation of late sound.

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

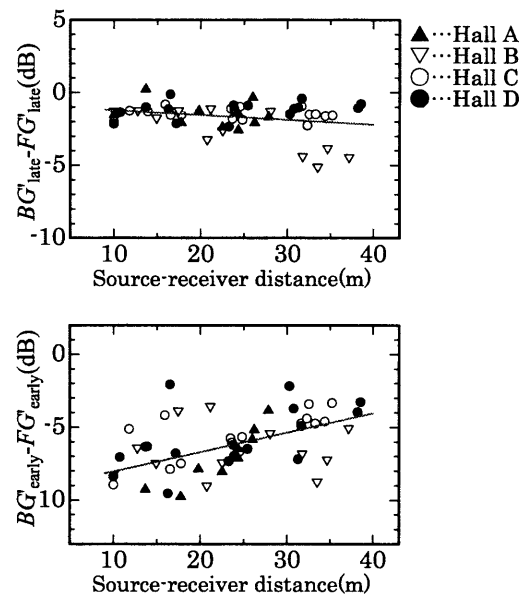


Fig.9 Level difference between BG' and FG' . (points and solid least-squares fit line)

期音の後方/前方レベル差についても併せて同図に示す。

まず初期音について見てみると、音源に近い位置では前方成分の方が後方成分に比べて5dB以上大きいですが、音源からの距離が大きくなるにつれて両者の差は少なくなる傾向が認められる。これは、客席前部では直接音の影響が大きいとともに初期反射音が前方エネルギー成分を多く含むためであり、逆に、後部座席では直接音の影響が小さく後壁からの反射音の影響が出てくるためであると考えられる。

これに対して後期音は、ホールおよび音源からの距離にはほとんど依存しておらず、前方成分の方が後方成分に比べて1~5dB程度大きいことがわかる。

5. 物理量相互の関係

後期音の方向特性を表す物理量はこれまでほとんど検討されていないため、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} (各方向成分エネルギーの全後期音エネルギーに対する割合) 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 (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}) の関係を見ると、全体として相関は低いと言える。

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

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、後期音エネルギーが大きい場合でも、前後方向エネルギーはその増加に影響せず、側方や鉛直方向エネルギーの寄与が大きいということを表している。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。

5.2 方向別レベルと方向別エネルギー率

方向別後期音レベルと方向別後期音エネルギー率の関係を方向ごとに調べた。相関係数の一覧を **Table 5** に示す。全体として両者の間には高い相関があるとは言えない。ただし、Hall A, B および Hall C の鉛直方向成分については高い正の相関が見られる (0.87~0.94)。

5.3 後期音エネルギー率と初期音エネルギー率

さらに、後期音エネルギー率と初期音エネルギー率の関係を方向別に調べた。相関係数の一覧を **Table 6** に示す。Hall A, B(多目的ホール) の鉛直方向成分について相関が見られるが、全体としては高い相関は認められない。

以上より、後期音エネルギーに関する物理量を検討する上で、レベルに関する指標 (方向別後期音レベル) は G , G_{late} との相関が当然高いものの、方向別エネルギー率については相関が低く予測が困難である。したがって、方向別後期音レベルだけではなく方向別エネルギーの割合に着目した指標についても検討していく必要があると考えられる。

6. 後期音の方向分布に関する考察

後期音の特性と空間的印象 (LEV) との関係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が実音場においてどのようになっているかについて明らかにしておくなければならない。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

Table 5 Correlation coefficients between directional late energy level and directional late energy ratio. (**, $p < 0.01$; *, $p < 0.05$)

Hall	Arrival direction		
	Longitudinal	Lateral	Vertical
A	0.11	0.58	0.87**
B	0.05	0.91**	0.94**
C	-0.31	0.63**	0.91**
D	-0.46	0.37	0.55*
4 Halls	-0.16	0.68**	0.54**

Table 6 Correlation coefficients between directional late energy ratio and directional early energy ratio. (**, $p < 0.01$; *, $p < 0.05$)

Hall	Arrival direction		
	Longitudinal	Lateral	Vertical
A	-0.38	-0.17	0.83**
B	0.60*	0.50*	0.78**
C	0.43	0.66**	0.33
D	0.57*	0.14	-0.57*
4 Halls	0.62**	0.38**	0.39**

向分布について考察する。各周波数ごとの 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.10** と **Fig.11** に示す。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 7** 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) 点付近に集中しているのがわかる。すなわち、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、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にしたがって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、周波数平均値を見てみると、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

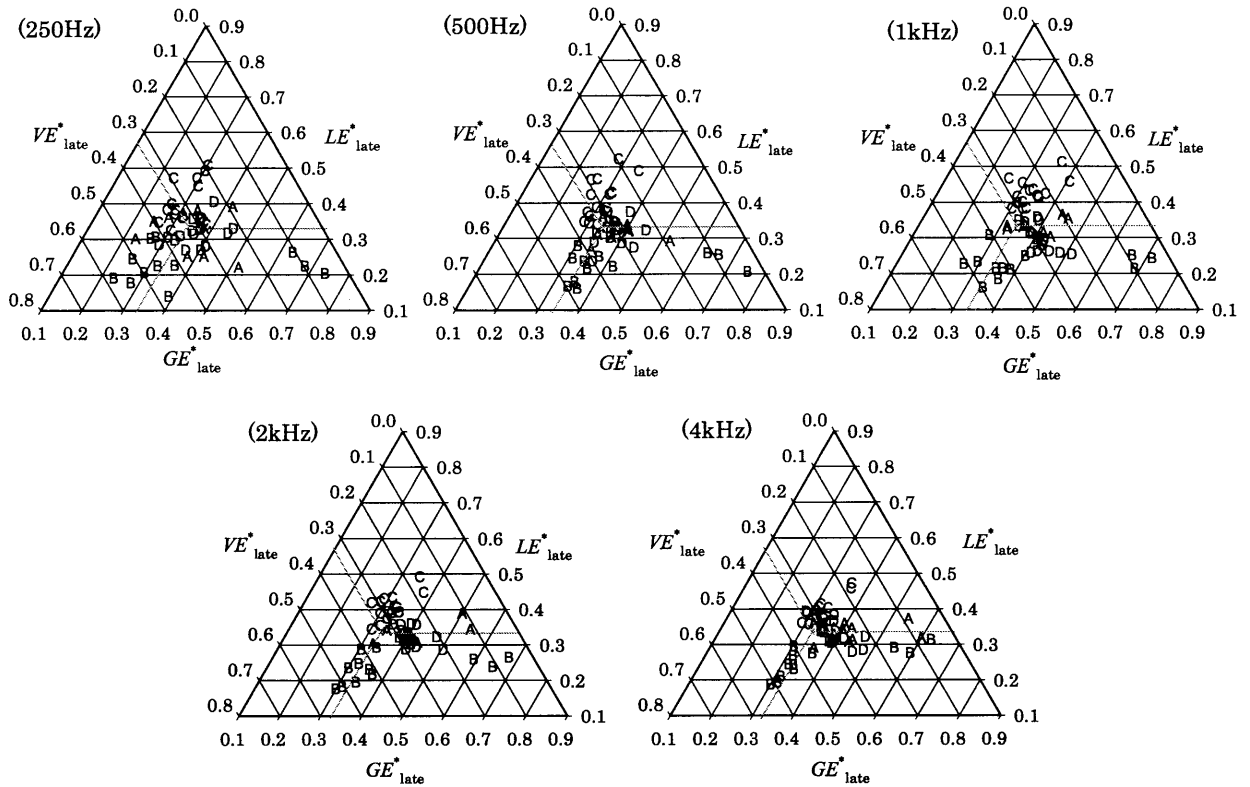


Fig.10 Normalized directional late energy ratio at five frequency-bands. (The letters mean the name of halls.)

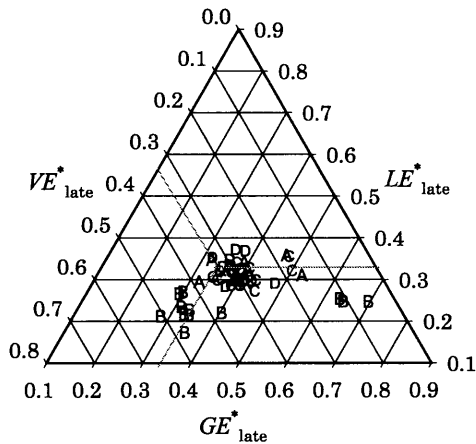


Fig.11 Normalized directional late energy ratio. (averaged over five frequency-bands)

い。 \bar{d}_{late} 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。

また、比較のために初期音に関する方向別エネルギー比(周波数平均値)の散布図を Fig.12 に示す。これより、分布の重心位置が、前後方向成分比が増加し側方・鉛直方向成分比が減少する方向へ移行しており、後期音の方向分布特性とは明らかに傾向を異にしているのがわかる。また、後期音の場合と比べ、ホール間の差は小さい。

Table 7 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

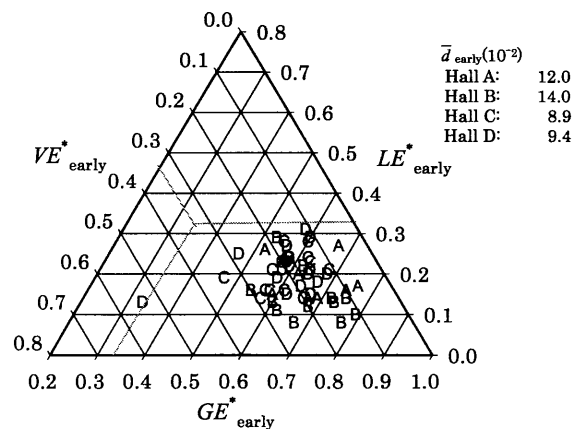


Fig.12 Normalized directional early energy ratio. (averaged over five frequency-bands)

7. まとめ

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し、方向別後期音レベルの変化幅の値等の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。

謝辞

実測にご協力頂いた各ホール関係者並びに比嘉規晶(九州大学大学院修了)、山口周平(九州大学卒業)、石井肇、市丸耕一朗(九州共立大学卒業)各君に感謝します。本研究は文部省科研費(No.12650606, 研究代表者 古屋浩)によるものである。

参考文献

- 1) J.S.Bradley and G.A.Soulodre, "Objective measures of listener envelopment," J. Acoust. Soc. Am. 98(5), 2590-2597(1995)
- 2) 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)
- 3) 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)
- 4) M.Morimoto, "The role of reflections from behind the listener in spatial impression," Applied Acoustics 62(2), 109-124(2001)
- 5) M.Barron, "Growth and decay of sound intensity in rooms according to some formulae of geometric acoustics theory," J. Sound Vib. 27, 183-196(1973)
- 6) M.Barron and L-J.Lee, "Energy relations in concert auditoriums. I," J. Acoust. Soc. Am. 84(2), 618-628(1988)

(受理：平成13年5月10日)