

コンサートホールにおける方向別後期音エネルギー率の予測に関する研究

中野 雄介

1. はじめに

コンサートホール音場を評価する重要な心理的要因“空間印象”(Spatial impression)の一つである「音に包まれた感じ」(LEV)は後期音と関連していることが知られている¹⁾が、後期音の物理特性とLEVの関係は明らかでない。そこで藤本研究室では、後期音とLEVの関係を検討するために一連の音響心理実験を行い、側方以外から到来する後期音もLEVに寄与すること²⁾、LEVは初期音/後期音エネルギー比 C_{80} および側方、上方、後方から到来する後期音のエネルギー率で説明できることを明らかにしてきた³⁾⁴⁾。

これらの知見を基に、LEVを考慮した音響設計を行うためには、設計段階において後期音の到来方向分布を予測できなければならない。現在、初期反射音の方向情報の予測手法については、音響模型実験やコンピュータシミュレーションをはじめ、ある程度確立されているのに対し、後期音の方向情報の予測に関しては全く研究事例が見当たらない。そこで本論文では、既存ホールにおける後期音エネルギー率を予測するための検討として、幾何音響シミュレーション⁵⁾により算出したインパルス応答から、方向別後期音を推定することの可能性について検討を行った。

2. シミュレーション

2.1 対象ホール

対象ホールは以前に実測調査⁶⁾を行った6ホール(Hall A~F)とした。各ホールの音響諸元をTable 1に、断面図をFig.1に示す。

Hall Aは2階席を有する一般的な多目的ホール、Hall Bはワンフロアで扇形の多目的ホール、Hall Cは2階席を有する音楽演奏を主とした多目的ホール、Hall D,Eはいずれも2、3階席にサイドバルコニーを有するシューボックス型のコンサートホール、Hall Fは2、3階席を有するコンサートホールである。観測点はHall A:10点(1階6点、2階4点)、Hall B:12点(1階12点)、

Table 1 Acoustical outline of 6 halls.

Hall	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	1,811	18,700	3.02	2.20	0.20
D	1,871	17,445	2.51	2.24	0.17
E	1,818	17,302	2.80	1.79	0.22
F	1,813	19,410	3.03	2.07	0.21

* Average over five octave-bands of 250~4kHz.

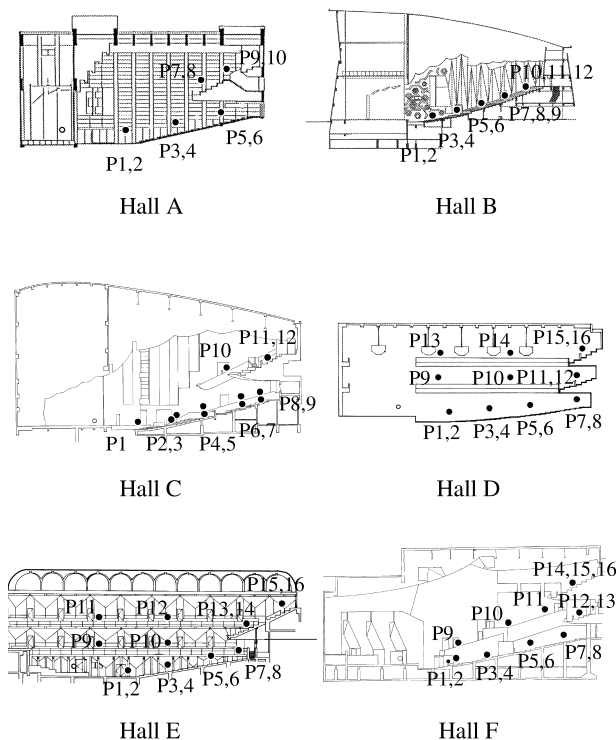


Fig.1 Sectional plans of 6 halls.

Hall C:12点(1階9点、2階3点)、Hall D:16点(1階8点、2階4点、3階4点)、Hall E:16点(1階8点、2階2点、3階6点)並びにHall F:16点(1階6点、2階5点、3階3点)である。

2.2 幾何音響シミュレーション

シミュレーションには、音線法と虚像法のハイブリッド手法により解析を行う幾何音響シミュレーションプログラムを用いた。ホールの図面情報(壁や床、天井を構成する各面の座標および吸音率)から、室内での音の伝搬経路を幾何音響解析法によって求め、各観測点におけるインパルス応答を算出した。得られたインパルス応答から分析時間内における直接音および全ての反射音の方向情報、時間情報ならびに周波数ごとのエネルギーが得られ、これより到来方向別の後期音エネルギーを算出した。

また、シミュレーションの設定条件は、全ホールとも放射音線本数52,502本、音線の追跡打ち切り時間800msとした。反射次数は、各ホールごとに平均自由行路と音線の追跡打ち切り時間によって定まる推奨反射次数(Hall A:76次、Hall B:61次、Hall C:68次、Hall D:74次、Hall E:75次、Hall F:73次)にそれ

それぞれ設定した。

2.3 解析時間

得られたインパルス応答について、直接音到来後 80ms 以降、区間を 20ms ずつ長くしていき、その区間の方向別後期音エネルギーを算出した。このとき、直接音の到来後ある時間 x が経過すれば、それ以降の後期音エネルギーは後期音エネルギー率にほとんど寄与しなくなるくらい小さくなると考え、20ms 区間の後期音エネルギーの変化率が 0.1dB/20ms 以下となる時刻 x で打ち切った。こうして得られた各ホールの x の値は、Hall A : 340ms、Hall B : 340ms、Hall C : 360ms、Hall D : 360ms、Hall E : 340ms 並びに Hall F : 380ms であった。このようにして得られたインパルス応答の 80 ~ x ms のデータを用いて、2.5 に示す方向別後期音エネルギーを算出した。

2.4 実測調査

シミュレーションによって推定される後期音エネルギーの妥当性を検討するために、藤本研究室が以前行った実測調査⁶⁾で得られた値と比較した。実測調査では、舞台中央に設置した 12 面体無指向性スピーカから短音(時間幅 40 μ s)を発生し、無指向性マイクロフォン(全方向のインパルス応答の測定)、双指向性マイクロフォン(側方、上下、前後方向のインパルス応答の測定)および単一指向性マイクロフォン(前方、後方のインパルス応答の測定)を用いて、同期加算法により時間応答波形を観測した。

2.5 後期音に関する物理指標

後期音エネルギーの方向成分を規定する物理量として、後期音レベル G_{late} (late : $t = 80 \sim \infty$ ms, 以下同様) および 4 つの方向別後期音レベル (横方向後期音レベル LG_{late} , 鉛直方向後期音レベル VG_{late} , 前後方向後期音レベル GG_{late} および後方向後期音レベル BG_{late}) を次式により定義した。

$$LG_{\text{late}} = 10 \log \left\{ \frac{\int_{80}^{\infty} p_{\infty L}^2(t) dt}{\int_0^{\Delta t} p_A^2(t) dt} \right\}, \text{dB}$$

$$VG_{\text{late}} = 10 \log \left\{ \frac{\int_{80}^{\infty} p_{\infty V}^2(t) dt}{\int_0^{\Delta t} p_A^2(t) dt} \right\}, \text{dB}$$

$$GG_{\text{late}} = 10 \log \left\{ \frac{\int_{80}^{\infty} p_{\infty G}^2(t) dt}{\int_0^{\Delta t} p_A^2(t) dt} \right\}, \text{dB}$$

$$BG_{\text{late}} = 10 \log \left\{ \frac{\int_{80}^{\infty} p_B^2(t) dt}{\int_0^{\Delta t} p_A^2(t) dt} \right\}, \text{dB}$$

ここで、 $p_{\infty L}(t)$, $p_{\infty V}(t)$, $p_{\infty G}(t)$ は双指向性マイクロフォンの出力音圧、 $p_B(t)$ は単一指向性マイクロフォンの出力音圧である。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音の音圧である。

3. 結果と考察

幾何音響シミュレーションで求めたインパルス応答から算出した後期音エネルギーレベルと各方向別後期音エネルギー率を実測と比較し、シミュレーションによる推定の有効性について検討した。

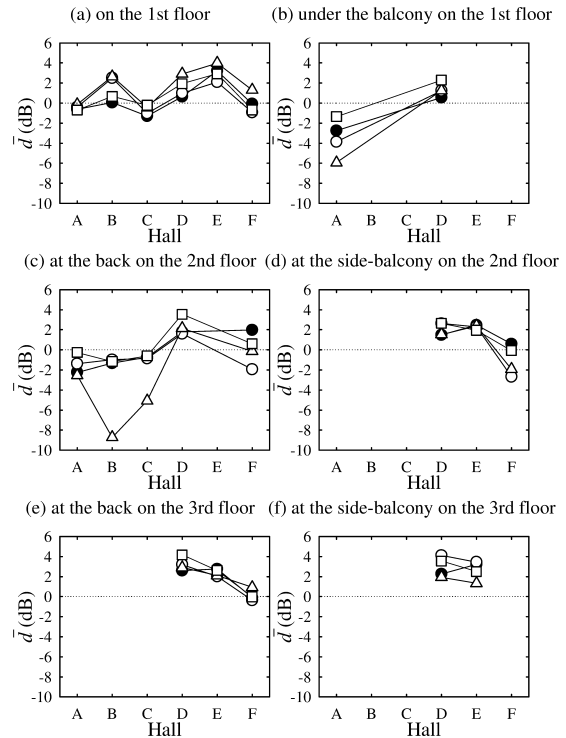


Fig.2 Comparison between d values at the seating areas in 6 halls, $\circ:G_{\text{late}}$, $\triangle:LG_{\text{late}}$, $\triangle:VG_{\text{late}}$, $\square:GG_{\text{late}}(t=80 \sim \infty \text{ ms})$.

3.1 後期音エネルギーレベル

まず、後期音エネルギーレベルについてみる。

幾何音響シミュレーションで予測した区間 80 ~ x ms における方向別後期音エネルギーに、Barron の予測式⁷⁾により算出した x ms 以降の後期音エネルギーを各方向均等に配分したものを付加し、全方向および各方向別の後期音エネルギーレベルを推定した。そして実測との対応の度合いを定量的に把握するために、観測点ごと方向別に、 $d = \text{実測値} - \text{シミュレーション計算値}(\text{dB})$ を算出した。

まず、ホール内のエリアごとの傾向をみるために、各ホールの観測点を似た傾向を示すエリア (a . 1 階席、b . バルコニー下 1 階席、c . 2 階後方席 (Hall B は 1 階後方席)、d . 2 階サイドバルコニー席、e . 3 階後方席、f . 3 階サイドバルコニー席) でグルーピングし、各グループ別にホールごとの d 値の平均値 \bar{d} を算出した。結果を Fig.2 に示す。

Fig.2(b) より、バルコニー下 1 階席をみると、Hall A は Hall D に比べて $VG_{\text{late}}, LG_{\text{late}}$ の \bar{d} 値が極端に小さくなっていることが分かる。Hall A では、何らかの原因により上方および側方からの反射音を過大評価してしまっていると考えられる。両ホールとも、実測値ではバルコニー下 1 階席の $VG_{\text{late}}, LG_{\text{late}}$ が他のエリアに比べて小さくなっていたが、シミュレーション計算値では、Hall D の $VG_{\text{late}}, LG_{\text{late}}$ は小さな値となっているのに対して、Hall A では特に小さな値となっておらず、この差が大きな原因となっている。これより、

バルコニー下席の上方および側方からの後期音エネルギーを幾何音響シミュレーションで予測することは少し問題があると判断される。また Fig.2(c) から、Hall A, C の 2 階後方席、Hall B の 1 階後方席の上方からの後期音についても同様のことが言える。以上のことから、幾何音響シミュレーションによる予測では、ある方向の後期音エネルギーレベルの予測精度の悪いエリアが存在することが分かる。

続いて、ホールごとの傾向をみる。先に述べたように、Hall A, Hall B, Hall C では、後期音エネルギーのホール内での傾向が実測から大きく外れているエリアが存在する。また Hall F についても、2 階サイドバルコニー前方席での側方・上方反射音は、実測と大きく異なっている。これに対して、Hall D, E ではすべての観測点において予測エネルギーレベルが実測を下回っているものの、そのホール内での傾向(バルコニー下で後期音(特に上方からの後期音)レベルが小さいこと、2, 3 階サイドバルコニー前方席では、他の 2, 3 階席に比べ後期音エネルギーが大きいことなど)は実測の特徴を良くとらえていることが分かる。これより、シューボックス型の Hall D, E では、他のホールに比べて、観測点ごとの後期音エネルギーレベルの分布を正確に予測できていると考えられる。ここで、Hall D, E のすべての観測点において予測エネルギーレベルが実測値を下回っているが、これは図面の詳細部での座標・吸音率の誤差から生じる反射経路の違いによる影響、回折の影響といったシミュレーションそのものの精度によるものとする。

3.2 後期音エネルギー率

続いて、後期音エネルギー率についてみる。方向別後期音エネルギー率は、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 $LE_{late}, VE_{late}, GE_{late}, BE_{late}$ を定義した。

シミュレーションから得られた方向別後期音エネルギー率(80 ~ x ms)について、実測との対応の度合いを定量的に把握するために、観測点ごと方向別に、 $p = (\text{実測値} - \text{シミュレーション計算値}) / \text{実測値}$ を算出した。

まず、ホール内のエリアごとの傾向をみるために、先ほどと同様のグルーピングを行い、各グループ別にホールごとの p 値の平均値 \bar{p} を算出した。結果を Fig.3 に示す。

Fig.3(b) より、バルコニー下 1 階席をみると、Hall A は Hall D に比べて VE_x の \bar{p} 値が極端に小さくなっていることが分かる。また、Fig.3(c) から、Hall B の 1 階後方席、Hall C の 2 階後方席についても同様の傾向が認められる。つまり、これらのエリアで後期音エネルギー率を予測することは少し問題があると判断され、先ほど後期音エネルギーレベルについてみた場合と同じことがいえる。

続いて、ホールごとの傾向をみると、シューボックス型の Hall D, E では、 \bar{p} の分布の範囲が他ホールに比べて小さいことが分かる。これは、先ほどの考察の結果と符合しており、シューボックス型の Hall D, E で

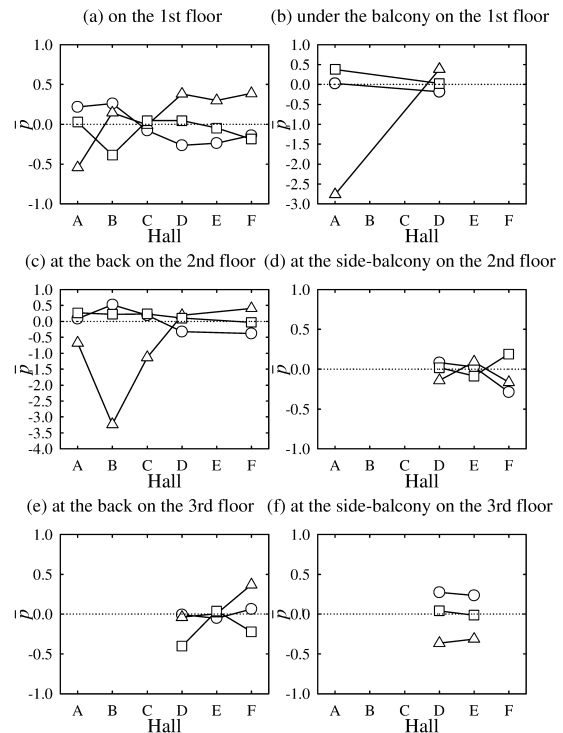


Fig.3 Comparison between p values at the seating areas in 6 halls, $\circ:LE_x$, $\triangle:VE_x$, $\square:GE_x(t = 80 \sim x \text{ ms})$.

は、ホール内のどのエリアにおいても比較的予測の精度が良いことを意味している。

一方、シューボックス型ホールについて、エリアごとの予測の程度に比較的良好な傾向がみられることが分かる。まず、Fig.3(a), (d), (f) より、シューボックス型の Hall D と Hall E では、1 階席、2 階サイドバルコニー席、3 階サイドバルコニー席の各エリアにおいて \bar{p} 値がよく似た値を示している(1 階席における \bar{p} 値の差は、 LE_x が 0.02、 VE_x が 0.08、 GE_x が 0.08、2 階サイドバルコニー席では、 LE_x が 0.05、 VE_x が 0.23、 GE_x が 0.11、3 階サイドバルコニー席では、 LE_x が 0.04、 VE_x が 0.06、 GE_x が 0.05)。さらに、Hall D, E において \bar{p} の分布が他ホールと比べて全体的にばらつきの範囲が小さいということも共通している。以上より、同程度のシューボックス型ホールにおける方向別後期音エネルギー率の \bar{p} 値はこのような傾向がみられる可能性が示唆される。今後、これらと同程度のシューボックス型ホールに関して検討を重ねてみる必要がある。

3.3 LEV 尺度値

3.1, 3.2 では後期音の物理量に関する予測値と実測値の差についてみてきたが、このような差は LEV の知覚に関して聴覚的にどのような差であるかを検討しておく必要がある。そこで、シミュレーションで得られた C_{80} 並びに方向別後期音エネルギー率を、これまでの音響心理実験から得られている後期音の方向特性と LEV の関係式(1)式⁴⁾に適用して、LEV 尺度値 $LEV_p(\text{Predicted})$

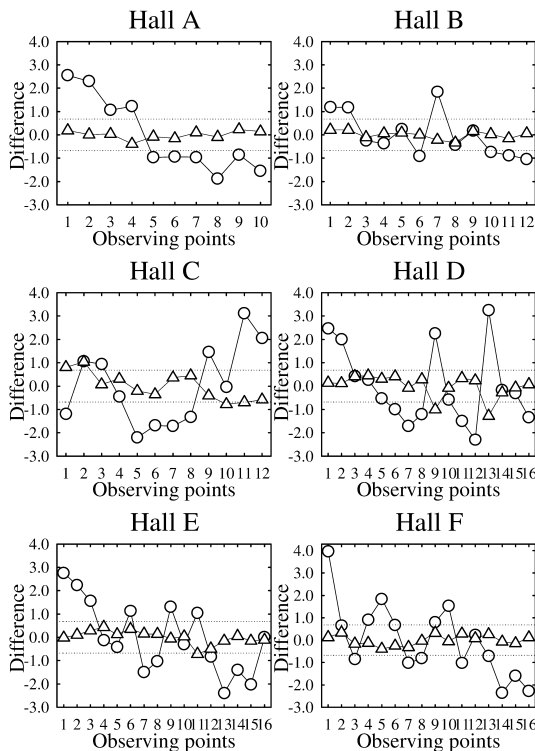


Fig.4 Difference of Predicted LEV in 6 halls, \circ :applying measured C_{80} , \triangle :applying predicted C_{80} .

LEV) を求め、同様に実測値から得られた LEV_p との差を算出し、実測との対応をみた。結果を Fig.4 に示す。ここで、両者を比較するために、求めた LEV 尺度値は平均 0、分散 1 で正規化している。

$$LEV_p = -2.263 - 0.265C_{80} + 2.610LE_{late} + 0.864VE_{late} + 1.580BE_{late} \quad (1)$$

なお、(1) 式は C_{80} と各方向別後期音エネルギー率 LE_{late} , VE_{late} , BE_{late} の値を様々に変化させた刺激音場の一対比較実験の結果から Thurstone Case V に基づいて構成した LEV の心理的間隔尺度を刺激の物理量で回帰させたものである。したがって LEV_p に 0.68 以上の差がある場合に LEV の大きさの知覚に有意差があると判断される。

Fig.4 より、両者の対応はそれほど良いとは言えず、多くの観測点において予測値と実測値とでは LEV において聴覚上の有意差が認められた (図の \circ で示す値)。すなわちシミュレーション予測では、LEV に関して実測値とは聴覚上別のもつと感ずるような後期音エネルギー率を予測していることが分かる。この理由として、LEV にもっとも影響の大きい C_{80} の影響が支配的であり、 C_{80} の予測値と実測値との対応が良くなかったからだと考えられる。

そこで、方向別後期音エネルギー率との対応を見ていくために、 C_{80} の値を実測で得られた値で統一して同様の検討を行った。その結果、Fig.4 より、ほぼ全ての

観測点において予測値と実測値とでは LEV において聴覚上の有意差が認められないことが分かる (図の \triangle で示す値)。すなわちシミュレーション予測では、LEV に関して実測値とは聴覚上同じものと感じるような後期音エネルギー率を予測しているといえる。ここで、Hall A, B において LEV_p の差の値が小さくなっているが、これまでの考察を踏まえると、予測された方向別後期音エネルギー率はそれほど合っていないものの、(1) 式から算出された LEV_p が結果的に近い値となったと考えるのが一般的である。

4. おわりに

既存ホールにおける後期音エネルギー率を予測するための検討として、幾何音響シミュレーションによって算出したインパルス応答から、方向別後期音を推定することの可能性について検討した。

その結果、シューボックス型の Hall D, E では、後期音エネルギーレベルにおいて実測との差があるものの、観測点ごとの傾向および後期音エネルギー率を概ね十分な精度で予測できることが分かった。一方、シューボックス型以外の Hall A, B, C および Hall F では、バルコニー下席や 2 階後方席などのエリアにおいて後期音エネルギーを過大評価している傾向がみられ、後期音エネルギーを正確に予測できないことが分かった。

また、予測値から推定される LEV の知覚に関して、実測値から推定される LEV と聴覚上の差がみられるかを検討したところ、 C_{80} を実測の値で統一した場合には、聴覚上有意な差は認められないことが分かった。

以上のことから、特定のエリアを除けば、幾何音響シミュレーションを用いて後期音エネルギー率を予測することについて一定の有効性が示されたと考える。今後は、LEV に最も影響が大きい後期音のエネルギーレベルの精度を上げていかなければならないと考える。

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含まれた感じの差異, 日本音響学会誌, 46, 449-457, 1990.
- 2) H.Furuya, K.Fujimoto, Y.J.Choi and N.Higa: Arrival direction of late sound and listener envelopment, *Applied Acoustics*, 62, 125-136, 2001.
- 3) A.Wakuda, H.Furuya, K.Fujimoto, K.Isogai and K.Anai: Effects of arrival direction of late sound on listener envelopment, *Acoust. Sci. & Tech.*, 24, 179-185, 2003.
- 4) A.Wakuda, Y.Nakano, H.Furuya and K.Fujimoto: Contribution of total energy and directional components of late sound to listener envelopment, *Proc. of ICA 2004*, IV-2461-2464, 2004.
- 5) E.D.Geest and C.F.McCulloch: Numerical Modeling in Geometrical Acoustics using the Conical Beam Method with Applications in Architecture, Industry and the Environment, *Proc. of EURO-NOISE 92*, Book 3, 965-975, 1992.
- 6) A.Wakuda, H.Furuya, K.Anai and K.Fujimoto: Directional characteristics of late sounds in concert auditoria, *Proc. of Forum Acusticum Sevilla 2002*, RBA-02-014, 2002.
- 7) M.Barron and L-J Lee: Energy relations in concert auditoriums. , *J.Acoust.Soc.Am.*, 84(2), 618-628, 1988.