

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方法の検討

姫野真一

1. はじめに

一般に良い音響効果を生み出すための要素として、音量が適切であること(音量感)、音楽が心地よく響くこと(残響間)、音が明瞭に聴こえること(明瞭性)、心地よく音に包まれた感じがすること(空間印象)の4点が挙げられ、さらに空間印象は見かけの音源の幅(ASW)と音に包まれた感じ(LEV)に分けられる¹⁾。そのうちLEVについては、本研究室が行ってきた一連の音響心理実験により C_{80} 、方向別後期音エネルギー率(LE_{late} 、 $VE_{late}GE_{late}$)によって説明できることが明らかになっている²⁾³⁾。

しかしながら、これまでの知見を基にLEVを考慮に入れた音場評価を行う上において、コンサートホールの設計段階で、LEVの評価を行うため必要な後期音エネルギーの方向情報予測の手法についての研究は現在のところ全くされていない。そこで本研究では幾何音響シミュレーション⁴⁾より算出したインパルス応答から方向別後期音エネルギーを予測することの可能性について検討した。

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⁵⁾を行った6ホール(Hall A~F)とした。各ホールの音響諸元を表-1に、断面図を図-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)、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、

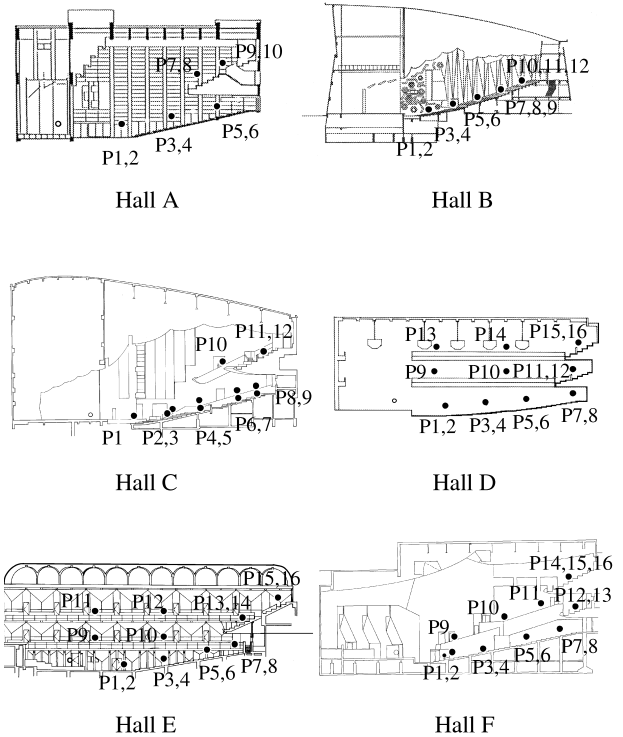


図-1 対象ホールの平面図及び断面図

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)にそれぞれ設定した。

表-1 対象ホールの音響緒元

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.

2.3 解析時間

インパルス応答について直接音到来後 80ms~100ms、80ms~120ms……というように打ち切り時間を 20ms ずつ長くしていき、その区間における方向別のエネルギーを算出した。その際にエネルギーの変化率が 0.1dB/20ms 以内となる時刻 x で打ち切り、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る。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 である。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

シミュレーションで得られた後期音エネルギーの妥当性を検討するために、本研究室が 2000 年度に行った実測調査⁵⁾ で得られた値を用いた。実測調査は対象ホールの観測点において行われた⁵⁾。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。

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⁶⁾ 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。こうして得られた予測値について、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、 $d = \text{実測値} - \text{シミュレーション計算値 (dB)}$ 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。結果を図-2 に示す。

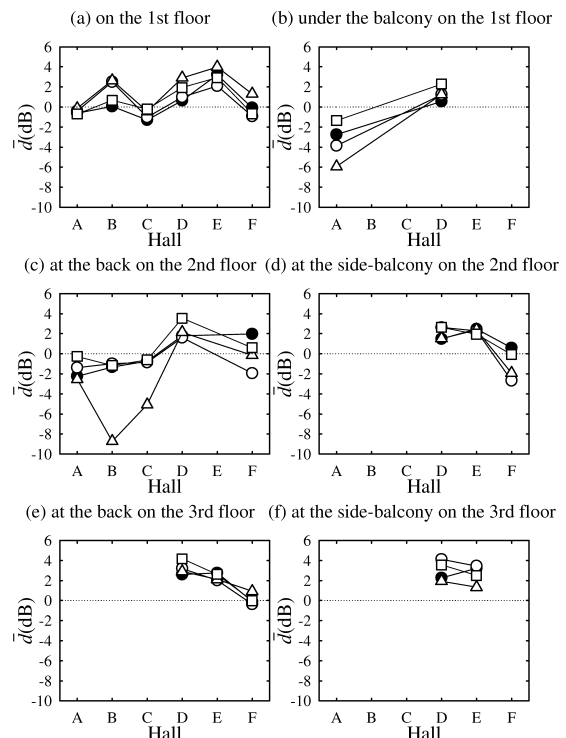


図-2 各エリアの全方向及び方向別の \bar{d} 値、●: G_{late} , ○: LG_{late} , △: VG_{late} , □: GG_{late} ($t=80 \sim \infty$ ms)。

図-2(b) より、バルコニー下 1 階席をみると、Hall A において LG_x 及び VG_x の \bar{d} 値が Hall D に比べて極端に小さな値をとっており、幾何音響シミュレーションが Hall A のバルコニー下の客席の LG_x, VG_x を過大評価していることが伺える。両ホールとも、実測値においてバルコニー下 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。つまり、幾何音響シミュレーションによる計算は、バルコニー席の下の客席の場合、Hall D では上方からの反射音を正しく予測できているが、Hall A のバルコニー下席においては、何らかの原因により上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。このことから、バ

ルコニー下の客席の上方後期音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。また図-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。以上より、幾何音響シミュレーションでは、ある方向の後期音エネルギーレベルで予測精度の悪いエリアが存在することが分かる。

次にホールごとの傾向をみてみる。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の観測点ごとの傾向が実測と大きく異な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 LE_{late}, VE_{late} は、実測と大きく異なっている。一方、Hall D, Hall 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が、ホール内の観測点ごとの傾向は実測とよく似ていることが伺える。この結果はシューボックスというホールの形状の類似が原因であると考えられ、これら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。結果を図-3に示す。

図-3(b)より、バルコニー下1階席をみるとHall Aにおいて VE_x の p 値がHall Dに比べて極端に小さな値を示している点は前節の d 値のときと同様である。また、図-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ことも前節と同様である。これらのエリアにおいては、幾何音響シミュレーションで予測することは問題があることを後期音エネルギー率、エネルギーレベルの両面において確認できる。

続いてホールごとの傾向をみると、図-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ことがわかる。1階席におけるHall DとHall Eの \bar{p} 値の差は、 LE_x が0.02、 VE_x が0.08、 GE_x が0.08であり、

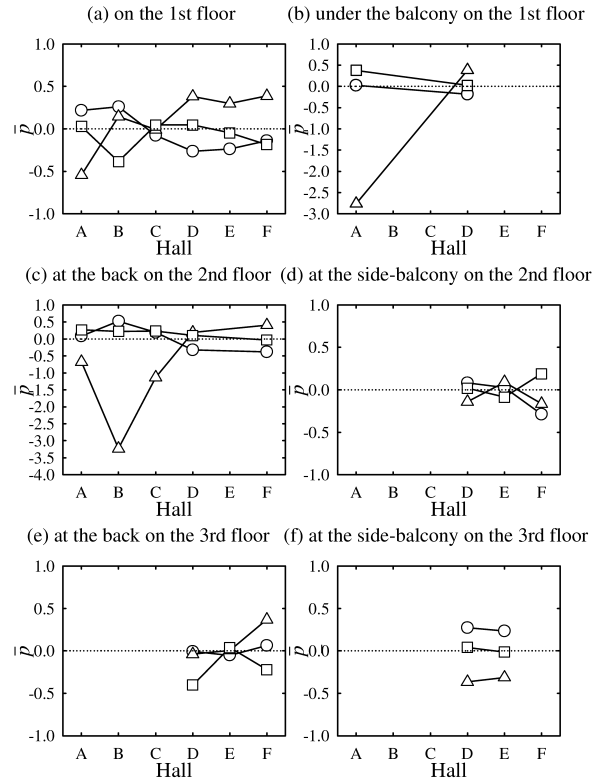


図-3 各エリアの全方向及び方向別の \bar{p} 値、○: LE_x 、△: VE_x 、□: GE_x ($t = 80 \sim x$ ms)。

いずれの点の \bar{p} 値も近い値となっている。また2階サイドバルコニー席においても、両ホールの \bar{p} 値の差は、 LE_x が0.05、 VE_x が0.23、 GE_x が0.11で、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となり、いずれもよく似た傾向を示している。また、Hall D, Hall Eにおける \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は前節とも共通して言える。これに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} 値も \bar{d} 値と同様に、このような傾向であることが示唆される。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は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、本研究室の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の関係から推定したLEV尺度値 LEV_p (Predicted LEV)(1式⁷⁾を用いて、考察を進める³⁾。幾何音響シミュレーションによって予測した C_{80} および方向別後期音エネルギー率($LE_{late}, VE_{late}, GE_{late}$)を用いて求めた LEV_p 値と実音場での測定値による LEV_p 値を比較し、考察する。

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

(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。

両者の対応を見るため、その差 (実測値より算出した LEV_p -シミュレーション予測値より算出した LEV_p) を算出した。また、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。結果を図-4 ○ に示す。

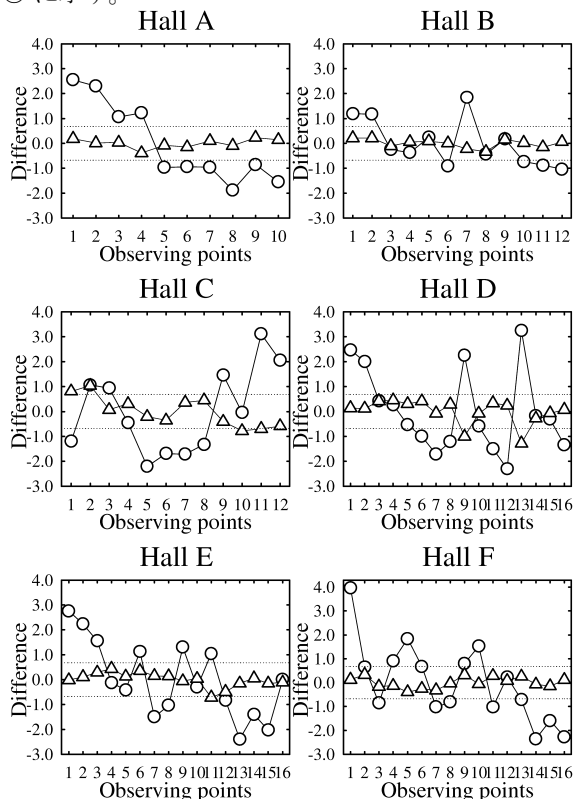


図-4 LEV_p 値における実測値と予測値の差, ○:実測 C_{80} 値, △:予測 C_{80} 値。

LEV の大きさの知覚に有意差があると判断される 0.68 よりも大きな差がある点がほとんどであり、シミュレーションにより予測される LEV と実際のホールの LEV が聴覚上、異なるように知覚されることになる。この理由として、LEV にもっとも影響力の大きい C_{80} 値の予測誤差が挙げられる。 C_{80} 値のシミュレーション予測値と実測値との違いをみると、ホール後方席、バルコニー下席などの音源から遠いホール後方部や、障害物のあるバルコニー下では C_{80} 値を小さく予測している。一方、1 階席、2 階サイドバルコニー前方席、3 階サイドバルコニー前方席などの音源に近いホール前方部では C_{80} 値を大きく予測する傾向がみられた。つまり、ホール後方部では総じて後期音エネルギーを過大評価し、ホール前方部では後期音エネルギーを過小評価していると言える。

一方、先ほどの検討では、あまりに C_{80} の影響が支配的であり、その他のパラメータである方向別後期音エネルギー率の影響を判断できなかった。そこで、後期

音エネルギー率との対応を見ていくために、予測値から LEV 尺度値を算出する際に、実測で得られた C_{80} の値を用いて同様の検討を行った。その結果、図-4△ に示す。ほとんどの観測点において、予測の LEV_p 値が実測の LEV_p 値とほぼ同じ値を示し、LEV の大きさの知覚に有意差を生じるとされる 0.68 よりも大きな値を示す観測点はほとんどない。このことより、同じ観測点においてはシミュレーションにより予測される LEV と実際のホールの LEV が聴覚上で差異を示すことはほとんどないと言える。Hall A, B においては LEV_p の差の値が小さくなっているものの、方向別後期音エネルギー率はそれほど精度良く求まっていなかったのに、(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、方向別後期音エネルギー率を推定することの可能性について検討を本研究で行った。

まず、方向別後期音エネルギーに予測において、Hall D, E ではエネルギーレベルの絶対値で実測との差があるが、観測点ごとの傾向やエネルギー率では観測点ごとの傾向をよく捉えていた。しかし Hall A, B, C 及び 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、方向別後期音エネルギー率の LEV への寄与を見るために、 C_{80} 値のみ実測の値、後期音エネルギー率はシミュレーション予測値を用いた LEV の尺度値 LEV_p では、実測値による LEV_p 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を予測できることが分かった。

以上から、方向別後期音エネルギー率の予測については一部のエリアを除いて一定の精度が得られている。今後は、 LEV_p 値に大きな影響を与える後期音エネルギーレベルの予測の精度をあげることが課題であろう。

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包まれた感じの差異, 日本音響学会誌, **46**, 449-457, 1990.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) M.Barron and L-J Lee: Energy relations in concert auditoriums. I, *J.Acoust.Soc.Am.*, **84**(2), 618-628, 1988.
- 7) 和久田晃子, 中野雄介, 古屋浩, 藤本一壽: 既存ホールにおける音に包まれた感じの特徴, 日本建築学会研究報告九州支部, (2005) (印刷中)