

# LEV 推定のための幾何音響シミュレーションによる 後期音方向分布予測に関する研究

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(残響感)、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。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( $LE_{late}$ 、 $VE_{late}BE_{late}$ )によって説明できることが明らかになっている<sup>1)</sup>。

LEVを考慮に入れた音場評価を行うためには、ホール設計段階で、後期音エネルギーの方向情報を予測することが必要である。私は卒業論文で、既存の6つのコンサートホール音場<sup>2)</sup>を対象ホールとして、幾何音響シミュレーションを用いて方向別後期音エネルギー率の予測の可能性を検討した<sup>3)</sup>。その結果、LEVの推定において幾何音響シミュレーションのある程度の有効性を示した。しかし、検討対象ホールは、形状が非常に複雑であり、シミュレーションと実測値の差の原因が、シミュレーション手法によるものなのか、それとも吸音率などの境界条件の設定によるものなのか明らかではなかった。

そこで本論文では、幾何音響シミュレーションのシミュレーション手法が、後期音の方向分布をどの程度的確に求められるかに焦点をあてて検討するために、比較的単純な形状の室を対象とすることで室内境界面の吸音率の推定精度を向上させ、実測したインパルス応答とシミュレーションから求められる時間応答関数から後期音の方向情報を比較し、考察する。

## 2. 実測

### 2.1 対象室

実測は、直方体に近い約60名を収容する室A(容積 $270.2\text{m}^3$ 、表面積 $296.7\text{m}^2$ の教室)と約100名を収容する室B(容積 $601.2\text{m}^3$ 、表面積 $665.3\text{m}^2$ の会議室)の2室で行った。測定時、室Aでは備品なしの状態にしたが、カーテンは取り外せなかったため、畳んだ状態で室内に残した。室Bでは全ての備品を室外に運び出すことが困難であったため、机42台を室の窓のある壁2面につけて並べた。各室の展開図を図-1、図-2に

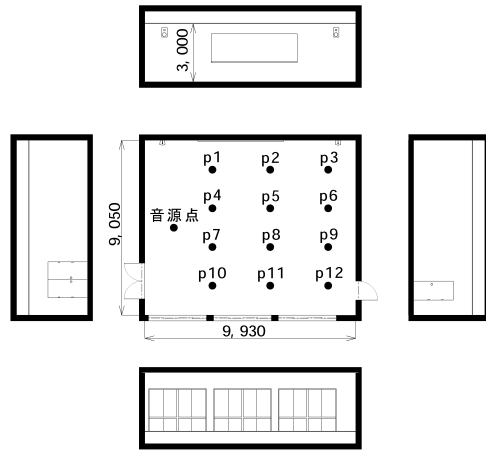


図-1 室 A 展開図

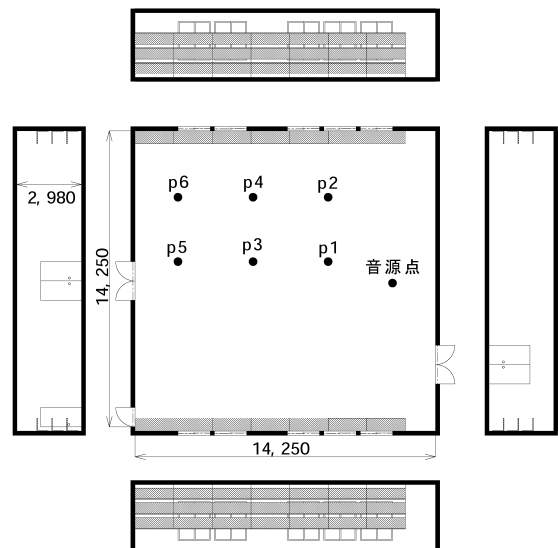


図-2 室 B 展開図

示す。

### 2.2 実測方法

実測に用いた測定装置のシステムブロック図を図-3に示す。12面体無指向性スピーカから短音(継続時間 $40\mu\text{s}$ )を発生し、無指向性マイクロフォン(全方向の測定)、双指向性マイクロフォン(側方、上下、前後方向の測定)および単一指向性マイクロフォン(後方の測定)を用いて、同期加算法により時間応答波形を観測した。

無指向性マイクロフォンで測定したインパルス応答から算出した減衰波形を見ると、 $125\text{Hz}$ から $500\text{Hz}$ の低音域ではSN比が十分に取れていなかった。これは測定音場の暗騒音が大きいことや測定装置の特性、スピー

カーの低音域の出力が小さいためだと思われ、これらの帯域は分析対象から除外した。

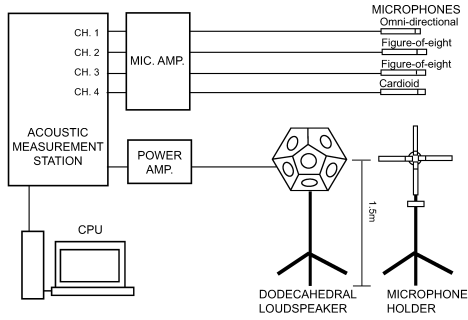


図-3 測定装置のシステムブロック図

### 2.3 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、側方後期音エネルギー率  $LE_{late}$  (late :  $t = 80 \sim \infty$  ms, 以下同様), 鉛直方向後期音エネルギー率  $VE_{late}$ , 前後方向後期音エネルギー率  $GE_{late}$ , 並びに後方向後期音エネルギー率  $BE_{late}$  を次式のように定義した。これらは、全方向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である。

$$\begin{aligned} LE_{late} &= \int_{80}^{\infty} p_{\infty L}^2(t) dt / \int_{80}^{\infty} p^2(t) dt \\ VE_{late} &= \int_{80}^{\infty} p_{\infty V}^2(t) dt / \int_{80}^{\infty} p^2(t) dt \\ GE_{late} &= \int_{80}^{\infty} p_{\infty G}^2(t) dt / \int_{80}^{\infty} p^2(t) dt \\ BE_{late} &= \int_{80}^{\infty} p_B^2(t) dt / \int_{80}^{\infty} p^2(t) dt \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 $p(t)$  は無指向性マイクロフォン、 $p_{\infty}(t)$  は双指向性マイクロフォン、 $p_B(t)$  は単一指向性マイクロフォンへの入力音圧である。

### 3. シミュレーション

音場の図面情報 (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音線法と虚像法のハイブリッド手法によって求め、各観測点における時間応答関数を算出した。得られた時間応答関数から分析時間内における直接音および反射音の方向情報、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。

なお、シミュレーションの設定条件は、全室とも放射音線本数 10,000 本、音線の追跡打ち切り時間 600ms とした。また反射次数は、各室とも 30 次とした。

#### 3.1 境界条件の決定方法

幾何音響シミュレーションの有効性を検討するためには、シミュレーションの結果と実測の結果が一致するような境界条件を設定することが望ましい。各仕上げ材の吸音率については各室とも 3 パターンずつの境界条件でシミュレーションを行い、最も実測との整合が取れているものを用いて分析を行った。

室 A, 室 B で入力した各仕上げ材の吸音率はそれぞれ以下の 3 パターンである。

- A-1. 全ての材について吸音率表<sup>4)</sup>から推定した値を入力 (カーテンの入力なし)
- A-2. 天井以外の材は吸音率表から推定した値、天井の吸音率のみ Eyring 残響式から求めた残響時間が実測の残響時間に近づくか等しくなる値を入力 (カーテンの入力なし)
- A-3. A-2 にカーテンの吸音力を加味
- B-1. 全ての材について吸音率表から推定した値を入力 (床の吸音率にニードルパンチカーペットの値を使用)
- B-2. 全ての材について吸音率表から推定した値を入力 (床の吸音率にタフテットカーペットの値を使用)
- B-3. 床以外の材は吸音率表から推定した値、床の吸音率のみ Eyring 残響式から求めた残響時間が実測の残響時間に近づくか等しくなる値を入力

4.1 で示す方向別後期音エネルギー率 ( $LE_{late}$ ,  $VE_{late}$ ,  $GE_{late}$ ) の予測値の実測値との三角座標上での距離の全測定点の平均を周波数ごとに表-1 に示す。この距離が短い程、実測値とシミュレーションによる値が近いことになるので、最も短い A-1, B-3 に着目して次章で分析結果を示す。

表-1 方向別後期音エネルギー率の値の実測値との三角座標上での距離

周波数(Hz)	A-1	A-2	A-3	B-1	B-2	B-3
1,000	0.097	0.168	0.150	0.329	0.227	0.235
2,000	0.099	0.162	0.149	0.313	0.239	0.250
4,000	0.090	0.165	0.156	0.275	0.260	0.189
平均	0.095	0.165	0.152	0.306	0.242	0.225

### 4. 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方向別後期音エネルギー率と LEV 尺度値を実測値と比較し、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。

#### 4.1 後期音エネルギー率の比較

まず、方向別後期音エネルギー率について見る。幾何音響シミュレーションで得られた時間応答関数から全方向および各方向別の後期音エネルギー率を算出した。 $LE_{late}$ ,  $VE_{late}$ ,  $GE_{late}$  を実測値とともに三角座標上に表したものを図-4, 図-5 に、 $BE_{late}$  の実測値との対応を表したものを図-6, 図-7 に示す。なお、予測値、実測値ともに  $LE_{late}$ ,  $VE_{late}$ ,  $GE_{late}$  の合計が 1.0 になるように補正を加えた。

室 A は予測値と実測値との三角座標上の距離の全測定点・全周波数の平均が 0.095 と小さく、予測精度が良いと言える (表-1)。測定点ごとの特徴を見ると、全体的に音源点から遠い点で精度が良い傾向がある。三角座標上の予測値と実測との距離の平均が 0.1 を上回っている測定点は 1,4,7,10,12 の 5 点で、1 列目を測

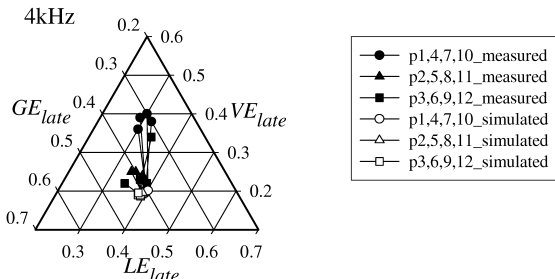
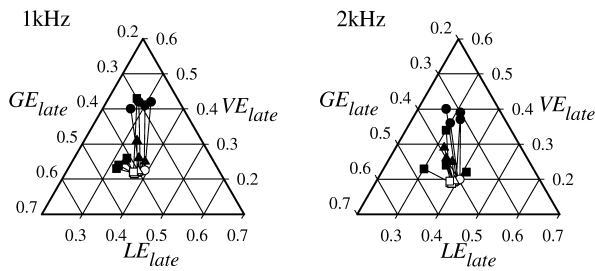


図-4 室 A 方向別後期音エネルギー率

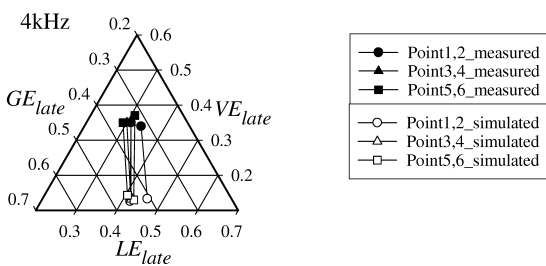
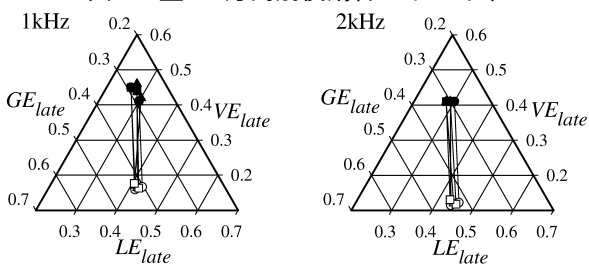


図-5 室 B 方向別後期音エネルギー率

定点 1,4,7,10, 2 列目を測定点 2,5,8,11, 3 列目を測定点 3,6,9,12 と見た場合、測定点 12 以外は全て 1 列目の点である。1 列目の予測値と実測値との距離の平均は 1kHz で 0.165, 2kHz で 0.161, 4kHz で 0.161 であるのに対して、2 列目が 1kHz で 0.047, 2kHz で 0.065, 4kHz で 0.047, 測定点 12 を除いた 3 列目の 3 点は 1kHz で 0.043, 2kHz で 0.055, 4kHz で 0.038 と後列に行くにしたがって精度が良くなっている (表-1)。

室 B は予測値と実測値との三角座標上の距離の全測定点・全周波数の平均が 0.225 と精度は室 A よりも劣る。室 A と比べると測定点間に目立った傾向の違いは見られなかった。

$BE_{late}$  については実測値とシミュレーション値の差を見ながら予測精度を確認する。室 A においては 1 列目の平均は 1kHz で 0.047, 2kHz で 0.038, 4kHz で 0.048 であるのに対して、2 列目は 1kHz で 0.017, 2kHz で 0.019, 4kHz で 0.016, 測定点 12 を除いた 3 列目の 3 点は 1kHz で 0.006, 2kHz で 0.006, 4kHz で 0.018 で

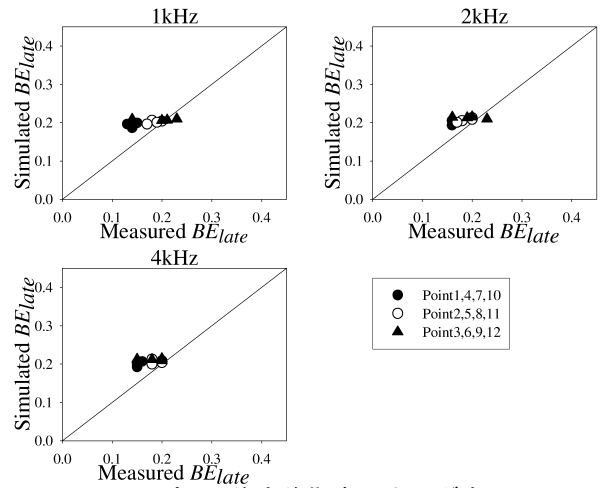


図-6 室 A 後方後期音エネルギー率

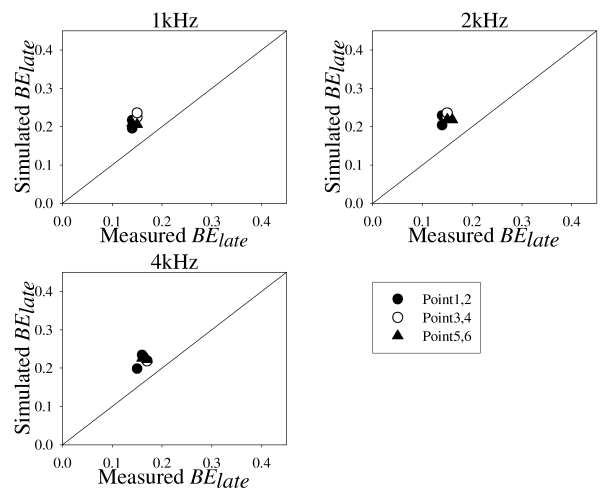


図-7 室 B 後方後期音エネルギー率

あった。室 B においては 1 列目を測定点 1,2 の 2 点とすると 1kHz で 0.066, 2kHz で 0.077, 4kHz で 0.061, 2 列目を測定点 3,4 の 2 点とすると 1kHz で 0.081, 2kHz で 0.080, 4kHz で 0.067, 3 列目を測定点 5,6 とすると 1kHz で 0.063, 2kHz で 0.064, 4kHz で 0.060 となり、1 列目と 3 列目の精度が 2 列目の精度を上回るようになった。

各室とも、反射性の材が多く、平行している壁面と平行する列ごとに予測精度が異なっていた。このような壁面は音波の干渉によってフラッターエコーが生じやすく、また実際に測定したインパルス応答にもフラッターエコーの様子が見てとれた。また、精度が劣る室 B の方がフラッターエコーが明確であった。幾何音響シミュレーションは干渉や回折などの音の波動的な性質を無視しているため、列ごとの精度の変化はシミュレーションのモデルと音の波動的な現象の差異が表れたものと思われる。

## 4.2 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、既往の研究<sup>3)</sup>で示されている

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) (2) 式<sup>5)</sup> を用いて考察をする。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 ( $LE_{late}$ ,  $VE_{late}$ ,  $BE_{late}$ ) 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。

$$LEV_p = -2.263 - 0.265C_{80} + 2.610LE_{late} + 0.864VE_{late} + 1.580BE_{late} \quad (2)$$

(2) 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音場の物理指標で回帰させたものである。 $LEV_p$  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。

実測値から算出した  $LEV_p$  値 (以下, Measured) と, 方向別後期音エネルギー率 ( $LE_{late}$ ,  $VE_{late}$ ,  $BE_{late}$ ) と  $C_{80}$  とともにシミュレーション予測値を用いて求めた  $LEV_p$  値 (以下, Simulated DLR+Simulated  $C_{80}$ ), さらに, 方向別後期音エネルギー率だけの精度を見るために, 方向別後期音エネルギー率はシミュレーション予測値,  $C_{80}$  は実測値を用いて求めた  $LEV_p$  値 (以下, Simulated DLR+Measured  $C_{80}$ ) の 3 つの値を比較したグラフを図-8, 図-9 に示す。

室 A においては, Simulated DLR+Simulated  $C_{80}$  と Measured の全測定点・全周波数の差の平均は 0.818 (室 A), 0.732 (室 B) であった。各室とも予測した  $C_{80}$  を用いたときは 0.68 を上回ってしまい, シミュレーションにより予測される LEV と実際の音場の LEV が聴覚上, 差異を感じる事の出来る誤差を含んでいた。一方, Simulated DLR+Measured  $C_{80}$  と Measured の全測定点・全周波数の差の平均は 0.112 (室 A), 0.237 (室 B) で, いずれの測定点でも 0.68 以下となり, 方向別後期音エネルギー率 ( $LE_{late}$ ,  $VE_{late}$ ,  $BE_{late}$ ) については LEV の推定に対して問題なく予測できていることが分

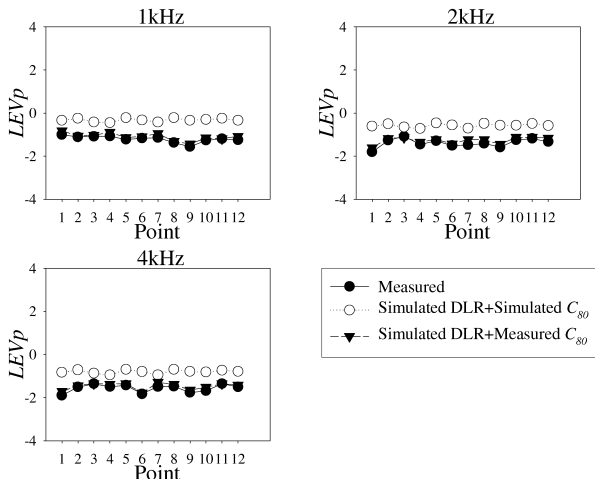


図-8 室 A の  $LEV_p$

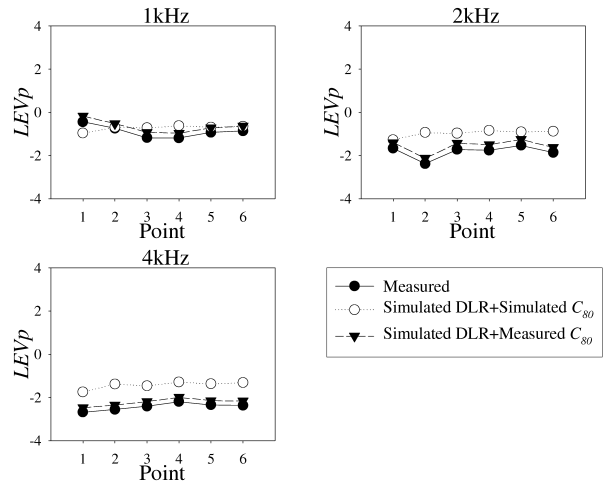


図-9 室 B の  $LEV_p$

かった。

## 5. おわりに

幾何音響シミュレーションのシミュレーション手法が LEV の推定に対してどの程度有効かを検討するため, 境界条件が把握しやすく比較的単純な形状の音場で実測したインパルス応答と, 幾何音響シミュレーションによって算出した時間応答関数から, 方向別後期音エネルギー率を推定した。

方向別後期音エネルギー率の予測精度は, 室 A において音源から遠ざかるほどよくなる傾向があった。これは, シミュレーションで用いた幾何音響モデルと音の波動的な現象の差異が何らかの影響を与えていると思われる。

さらに, 聴感上の観点からの精度を確認するために LEV の尺度値  $LEV_p$  を用いて予測値と実測値を比較した。方向別後期音エネルギー率はシミュレーション予測値,  $C_{80}$  は実測値を用いて求めた  $LEV_p$  値と実測値から求めた  $LEV_p$  値の差が全ての測定点で 0.68 を下回り, 幾何音響シミュレーションの LEV の推定に対する有効性を確認した。

今後は, 音の波動的な振る舞いが予測精度に与える影響なども含めて, LEV の推測に幾何音響シミュレーションを適用できる条件をまとめることが課題であろう。

## 参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 姫野真一, 和久田晃子, 古屋浩, 藤本一壽: LEV 推定のための方向別後期音エネルギー率の予測に関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (環境工学), 153-154(2005.9) .
- 4) 前川純一, 森本政之, 阪上公博: 建築環境音響学 第 2 版, 共立出版株式会社, 226-229, (2000.8).
- 5) 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, 151-152(2005.9).