反射音の空間バランスに着目した音に包まれた感じの定量化方法

A NEW OBJECTIVE MEASURE FOR EVALUATION OF LISTENER ENVELOPMENT FOCUSING ON THE SPATIAL BALANCE OF REFLECTIONS

羽入 敏樹*, 木村 翔**, 千葉 俊***

Toshiki HANYU, Sho KIMURA and Suguru CHIBA

We conducted seven subjective experiments in order to clarify the effects of the direction of arrival, spatial distribution, temporal distribution and listening level of reflections on listener envelopment(LEV). As a results, it became clear that the contribution of a reflection on LEV depends on the direction of arrival of other reflections and that it is not possible to make independent evaluations. LEV cannot be adequately evaluated with a physical index that weights and integrates individual reflection by the direction of arrival like the lateral energy ratio. It is necessary to consider the mutual effects of reflections by some means and to quantify the spatial distribution of reflections. Accordingly, we proposed SBTs quantifying the spatial distribution of reflections using point of gravity time T_s for each direction and demonstrated that it is possible to obtain a good correlation with the psychological scores of LEV.

Keywords : *Listener envelopment, Spatial impression, Sound field, Spatial balance, Spatial information, Point of gravity time*

音に包まれた感じ、空間印象、音場、空間バランス、空間情報、時間重心

1. はじめに

コンサートホール等の室内音響設計を、より適確に進めていく上では、室の大きさや形状、壁面材料などの建築的諸条件によって創出される室内音場の物理特性と受聴者が感じる心理量との関係をさらに明確にしていく必要がある。コンサートホールの音場を評価する重要な属性の一つとして音場の空間印象がある。Barron[1] らが側方反射音と音場の空間印象に関する研究成果を発表して以来、空間印象を評価する指標として側方エネルギー率が定着しつつある。空間印象は、少なくとも見かけの音源の幅 (Auditory Source Width : ASW) と音に包まれた感じ (Listener Envelopment : LEV) の二つの要素感覚に分けられることが森本らによって明らかにされている[2]。そのうち ASW に関しては研究例が多く、物理指標も種々提案されているが、LEV に関してはまだ研究例が少ない。

最近では LEV の物理指標として Bradley らが 80ms 以降の残響部の側方反射音レベル[3,4]、Beranek が両耳間相関度[5]を提案している。一方、側方以外の方向から到来する反射音に着目した研究例も見られる。例えば、森本らは両耳間相関度や側方エネルギー率が一定でも反射音の前後エネルギー比が変化すると LEV が変化する[6]ことを報告し、古屋らは両耳間相関度を大きくする要因となる上方反射音が LEV に貢献すること[7]を報告している。また、筆者らは側方

エネルギー率が大きくなる条件よりも、反射音があらゆる方向から受聴者を取り囲むような条件ほど音に包まれた感じが増す現象について報告した[8]。このような研究事例から見られるように、LEV に関しては、側方エネルギー率や両耳間相関度以外の要因が存在していることが推察される。筆者らは様々なホールの空間情報を測定してデータを蓄積してきたが、実際のホールにおいても比較的響きが良いとされるシューボックスタイプのホールでは、側方だけでなくあらゆる方向 (特に上方や後方) から多くの反射音が受聴者を取り囲むように到来している。

そこで本報では、これらの現象を系統的に検討するため、反射音の到来方向、空間分布、残響時間、受聴レベルが音に包まれた感じ (LEV) に及ぼす影響を7つの心理実験を行って調べることにした。また、それらの実験結果から LEV の物理指標が備えるべき必要条件について考察し、ある反射音の LEV への寄与が、他の反射音の到来方向に依存し、独立に評価できないことを明らかにした。さらにその結果に基づいて、反射音の空間分布を定量化する方法について検討を行なった。

2. 実験方法

実験は全て無響室において、シミュレーション音場を用いて行

* 日本大学短期大学部建設学科 助手・工博

** 日本大学理工学部建築学科 教授・工博

*** 高砂熱学工業(株) 工修

Research Assoc., Dept. of Construction, Nihon University Junior College, Dr. Eng. Prof., Dept. of Architecture, College of Science and Technology, Nihon Univ., Dr. Eng.

Takasago Thermal Engineering Co., Ltd., M. Eng.

なった。音場再生には、無響室に設置された図1に示す 16ch のマルチチャンネル音場再生システムを用いた。スピーカは、両耳を含む水平面内で被験者から 1.5m の距離に 22.5° の等間隔に設置した。実験にあたっては、16 台のスピーカの中から必要な台数のスピーカを選択して直接音あるいは残響音を再生した。再生に必要な方向別応答は、図2に示す基本音場を加工した仮想音源分布から合成した。これらの方向別応答波形にモーツァルト作曲「ディバリティメント第三楽章」の約 10 秒間を畳み込んだものを刺激として用いた。なお、本実験においては初期反射音と後期残響部を区別していない。本文中で残響音と記しているときは、特に後部残響音等の記述が無い限り直接音以外のすべての反射音を指している。

本論文の研究目的は、“音に包まれた感じ”に影響を及ぼす要因を抽出し、抽出した要因を考慮して“音に包まれた感じ”を定量化するための評価モデルの仮説を構築することにある。したがって、まず考えられる要因に関してそれぞれ独立した実験を計画し、実験ごとにそれぞれの要因の“音に包まれた感じ”への影響を精度良く調べることにした。そのため心理実験手法として、各実験間のデータ比較はできなくなるが、刺激に対する判断の信頼性、判断の容易さ、被験者数の制約などを考慮し、シェッフェの対比較法を用いることにした。

被験者は、建築音響の研究を行っている学生 5 ～ 10 名で、被験者数および被験者のグループ構成は実験ごとに異なっている。刺激対は、被験者ごとにランダムに異なる順番で提示した。順序効果を相殺するために、刺激の順番を入れ替えた刺激対についても評価してもらった。その際、実験時間が長くなりすぎないように配慮して 2 回の実験に分けた。結果として、各被験者は同じ組み合わせの刺激対を刺激の順序を変えて 2 回評価したことになる。被験者には、各刺激対に対して、後の音場が前の音場と比較してどれだけ音に包まれているかを、前の音場と比べて“1. 非常に包まれている感じ”、“2. かなり包まれている感じ”、“3. 少し包まれている感じ”、“4. 同じ”、“5. 少し包まれていない感じ”、“6. かなり包まれていない感じ”、“7. 非常に包まれていない感じ”の 7 段階で判断してもらった。被験者は 7 段階評価に対応する番号を口頭で答え、実験者は別室においてそれをマイクロホンでモニターして記録した。なお、被験者には“音に包まれた感じ”を“まわりから到来する音に包まれている感じあるいは浸っている感じ”であると教示した。結果の処理は、刺激対の順序効果を考慮したため浦の変法[9]に従って行った。

図1 マルチチャンネル音場再生システムのブロックダイアグラム

図2 基本音場の仮想音源分布と仮想音源を時系列に再合成した無指向性インパルス応答 (残響時間 2.0 秒)

3. 反射音到来方向の影響

Barron らは初期反射音の呈示角度を変化させて、反射音到来方向の Spatial Impression (SI) への影響を調べ Lf を提案した[1]。Barron は論文[10]で、SI を “the source appeared to broaden” と表現していることから、おそらく SI は ASW に近いものであったと思われる。LEV に関しては、先に述べたように Bradley が反射音の到来角度分布と LEV との関係を心理実験により調べ、側方反射音が存在するときに、顕著な音に包まれた感じが得られることを明らかにしている[3,4]。しかし、反射音の到来角度分布を調べたもので、同じ時間構造の反射音の到来方向をパラメータにして LEV への影響を調べたものではない。さらに、反射音の到来方向は正面に対して $\pm 90^\circ$ の側方までであり、後方から到来する反射音の影響は未知である。森本らは後方反射音に着目し、前後エネルギー比を変化させて LEV に及ぼす影響を調べている[6]。しかし、この実験も前方と後方という大きなエリア分けであり、反射音の到来方向をパラメータとした実験ではない。

そこでまず、反射音の到来方向が LEV に及ぼす影響を調べるための実験を行なった。

3-1. 実験条件

実験は図3に示すように、正面と左右の3方向から直接音あるいは残響音を呈示するシンプルな音場を用いて行った。なお、表1に示すように、正面スピーカから直接音のみ呈示 (実験1)、正面スピーカに残響音を付加 (実験2) の2つの条件について実験を行った。各スピーカに対応した方向別応答波形を図4に示す。方向別応答の残響音は、図2に示した仮想音源分布を実験1では空間的に左右2等分、実験2では3等分し、各エリアに存在する仮想音源を時系列に合成することによって作成した。また、各スピーカに対応した方向別応答は変化させず、同じ時間構造を持つ反射音の到来方向が変化したときの LEV への影響を調べることにした。両実験で用いた全音場の無指向性インパルス応答は不変で、残響時間は約 2.0 秒である。その他の実験条件は以下のとおりである。

- A. 左右の残響音の呈示方向: $\pm 22.5^\circ \sim \pm 157.5^\circ$ まで 22.5° きざみの 7 方向
- B. 刺激対の総数: 21 対
- C. 刺激の呈示レベル: 受聴点で約 72dB(A)
- D. 被験者: 5 名 (各人 2 回ずつ評価)

図3 実験1、2におけるスピーカ配置

表1 実験1、2における音場条件

	実験1	実験2
Sp1	直接音のみ	直接音+残響音
Sp2	残響音	残響音
Sp3	残響音	残響音

図4 各チャンネルのインパルス応答

3-2. 結果と考察

実験1および2の結果を図5、図6に、側方反射音レベルLG[3]の変化を図7に示す。3-1式で表わされるLGは、左右の残響音呈示方向90°をピークとして前後対称なカーブとなる。

$$LG_{90}^{\infty} = 10 \log \left[\frac{\int_{90}^{\infty} p^2(t) \cos^2(\alpha) dt}{\int_0^{\infty} p_A^2(t) dt} \right] \quad \dots(3-1)$$

ただし、 $P_A(t)$ は無響室の10m点での測定システムの応答

正面スピーカから直接音のみ呈示した実験1では、LEVはLGの変化とよく対応しており90°で最も大きくほぼ前後対称なカーブとなっている。正面スピーカに残響音を付加した実験2においても、90°でLEVが最も大きくなっている。したがって、側方から到来する残響音ほどLEVへの寄与が大きいことがわかる。

LGはその定義から正面方向から到来する残響音に何ら影響を受けないはずである。しかし、正面方向から残響音が到来する実験2では、左右の残響音を前方より後方から呈示した方がLEVの評価が高くなっている。これは、正面方向の残響音がLEVに何らかの影響を及ぼしていることを示しており、LGのような側方エネルギー率では説明できない。一方、この現象が前後エネルギー比の影響であれば、実験2だけではなく実験1の結果にも現れるはずである。す

なわち、正面方向の残響音の有無によってLEVの変化の傾向が異なる現象は、左右の残響音が正面方向の残響音と相互に作用し合いLEVに影響を及ぼした結果と考えることができる。側方エネルギー率でも前後エネルギー比でも説明できないこのような効果の存在は、残響音の到来方向だけではLEVを十分に評価できないことを示唆している。

図5 実験1の心理尺度値

図6 実験2の心理尺度値

図7 実験1、2におけるLGの変化

4. 反射音の空間分布の影響

反射音の空間分布とLEVの関係については、Bradleyが心理実験を行って調べている[3,4]。Bradleyの実験では、側方エネルギー率がそうであるように、反射音到来方向によるLEVへの寄与は両耳軸に対して前後対称であるという仮定を導入している。その仮定により、残響音の呈示方向を正面スピーカのみ、左右±35°を加えた3台のスピーカ、さらに±90°を加えた5台のスピーカの3条件の空間分布を使っており、後方から残響音を呈示していない。反射音の寄与が両耳軸に対して前後対称であるという仮定がLEVにおいて成り立つかどうかは疑問である。前後エネルギー比の影響を調べた森本の論文[6]は、その仮定が成り立たないことを示唆している。また、今回筆者らが行った実験2の結果は、少なくとも正面方向に残響音が存在する場合にはその仮定が成り立たないことを示している。

そこで、反射音の空間分布がLEVに及ぼす影響を調べると共に、実験2で見られた反射音の相互作用を検証することを目的として次の心理実験を行った。

4-1. 実験条件

実験は図8、図9に示すように、実験2の条件に、到来方向を固定した残響音を前方±45°に加えた音場（実験3）、後方±135°に加えた音場（実験4）を用いて行った。

各スピーカに対応した方向別応答波形を図10に示す。方向別

応答の残響音は、図2に示した仮想音源分布を空間的に5等分し、各エリアに存在する仮想音源を時系列に合成することによって作成した。また実験1、2と同様に、各スピーカに対応した方向別応答は変化させず、同じ時間構造を持つ反射音の到来方向が変化したときのLEVへの影響を調べることにした。両実験で用いた全音場の無指向性インパルス応答は不変で、残響時間は約2.0秒である。その他の実験条件は以下のとおりである。

- A. 左右の残響音の呈示方向： $\pm 22.5^\circ \sim \pm 157.5^\circ$ まで 22.5° きざみで固定Sp方向を除いた6方向
- B. 刺激対の総数：15対
- C. 刺激の呈示レベル：受聴点で約72dB(A)
- D. 被験者：10名（各人2回ずつ評価）

図8 実験3におけるスピーカ配置図

図9 実験4におけるスピーカ配置図

図10 各チャンネルにおけるインパルス応答

4-2. 結果と考察

実験3、4の結果を図11、図12に、各条件におけるLGと前

後エネルギー比をそれぞれ図13、図14に示す。LGは呈示方向を変化させた左右の残響音（以下、単に左右残響音）の到来方向が 90° の条件をピークとして実験1、2と同様に前後対称なカーブを描き、実験3と4で全く同じ値となる。前後エネルギー比は、実験3、4ともに左右残響音が前方より後方にある場合に大きな値となる。すなわち、左右残響音の到来方向をパラメータとした側方エネルギー率および前後エネルギー比の変化は、固定Spからの残響音（以下、単に固定残響音）の到来方向に依存せず同じ傾向を示す。

固定残響音を前方 $\pm 45^\circ$ に加えた実験3の結果（図11）を見ると、左右残響音が前方より後方にある方がLEVは大きくなりLGの変化と符合しない。左右残響音が前方より後方にある場合にLEVが大きくなることは前後エネルギー比に対応する。

固定残響音を後方 $\pm 135^\circ$ に加えた実験4（図12）では、実験3と異なり左右残響音が後方より前方にある方がLEVは大きい値となった。これはLGおよび前後エネルギー比の変化と符合しない。

実験3と4の結果を比べてみると、左右残響音の到来方向をパラメータとしたLEVの変化は、固定残響音の到来方向に依存することがわかる。このような変化は、ある反射音のLEVへの寄与が、他の反射音の到来方向に依存し、独立に評価できないことを示している。したがって、側方エネルギー率のように個々の反射音を到来方向で重み付けして積分する物理指標ではLEVを十分に評価できない可能性がある。LEVを評価するには、反射音相互の作用を何らかの方法で考慮する必要があるものと考えられる。

図15は実験3、4の各条件におけるスピーカ配置をLEVの大きい順に並べたものである。これを見ると、スピーカが受聴者を空間的にバランス良く取り囲んでいる条件ほどLEVが大きいことがわかる。これは以前筆者らの行った実験[8]で得られた“反射音があらゆる方向から受聴者を取り囲むような条件ほど音に包まれた感じが大きい”という知見と一致する。また、実験3と4における左右残響音が 22.5° と 157.5° の音場は、左右残響音の到来方向が両耳軸に対して互いに前後対称の関係にあり、LGも全く同じ値である。しかし、両者のLEVには有意な差がみられる。このことは、反射音のLEVへの寄与は、他方向に反射音が存在する場合には必ずしも両耳軸に対して前後対称とはならないことを示している。

以上の結果をまとめると、個々の反射音を到来方向で重み付けして積分する方法ではLEVを十分に評価できない可能性があり、反射音相互の作用を考慮して反射音の空間分布を定量化する必要があると考えられる。

図11 実験3の心理尺度値

図12 実験4の心理尺度値

図13 実験3および実験4
におけるLG

図14 実験3および実験4
における前後エネルギー比

図15 LEVの大きい順に並べたスピーカ配置

5. 残響時間と受聴レベルの影響

Bradley は、反射音の時間分布と LEV の関係について心理実験を行ない、直接音に対する反射音のレベルとディレイが大きいほど、または残響時間が長いほど LEV が増すことを明らかにしている[3]。さらに、受聴レベルが LEV に及ぼす影響も非常に大きいことを明らかにしている[4]。Bradley はこれらの実験を根拠にして 80ms 以降の残響部の側方反射音レベル LG を提案している。LG は 80ms までの反射音の影響を全く考慮していない。実音場では一般に、80ms 以内にレベルの大きい初期反射音が存在しており、レベルが大きいためにディレイが小さくても LEV への影響が大きい可能性がある。さらに、直接音や 80ms までのレベルの大きい初期反射音にそれ以降の反射音の効果がマスクされる可能性も否定できない。

また、LG は定義式の分母がストレングス G と同様に、無響室の 10m 点における測定システムの応答になっている。すなわち LG は、側方に重み付けした絶対レベルとなっており、直接音に対する相対的な時間構造や空間構造は考慮していない。

ここでは、反射音の時間構造と受聴レベルが LEV に及ぼす影響に関する基礎的な知見を得るために、残響時間と受聴レベルを要因とした心理実験を行った。

5-1. 実験条件

実験は、反射音の空間分布は変化させずに残響時間だけを変化させた場合（実験5）、残響時間と空間分布の両方を変化させた場合（実験6）、反射音の時間構造、空間分布が全く同じ条件で受聴レベルを変化させた場合（実験7）について行った。

実験5は、図1に示したスピーカ全てを使用して16方向から残響音を呈示する条件で、反射音の到来時間を変えずにエネルギー減衰だけを変化させる事で、残響時間1.0秒～3.0秒まで0.5秒刻みの5音場を設定した。

実験6は、図16に示すように、反射音の空間分布に関して音源方向から左右±45度分布する5台のスピーカを用いた条件と、左右±90度分布する9台のスピーカを用いた条件の2条件を、残響時間に関しては1.0秒、2.0秒、3.0秒の3条件とし、合計6音場を設定した。

実験7は、実験5と同様に16方向から残響音を呈示する条件で、反射音の空間分布、到来時間、エネルギー減衰を変化させずに受聴レベルだけを-6～+6dBまで3dB刻みで変化させた5音場を設定した。

各実験に用いた音場の無指向性インパルス応答を図17に示す。

その他の実験条件は以下のとおりである。

- A. 刺激の呈示レベル：実験5、実験6は受聴点において72dB(A)、実験7はレベル±0dBの音場で受聴点レベル72dB(A)
- B. 被験者：10名（各人2回ずつ評価）

図16 実験6のスピーカ配置

図17 実験に用いた音場の無指向性インパルス応答

5-2. 結果と考察

残響時間の影響

残響時間を変化させた実験5の結果を図18に示す。これを見るに残響時間が長くなるにしたがってLEVも大きくなる傾向にある。

また、2.5 秒と 3.0 秒の間を除く全ての条件間で有意な差が認められることから、音の到来方向が同じでも残響時間が違うと空間印象が異なることがわかる。

残響時間と反射音の空間分布の両方を変化させた実験 6 の結果を図 19 に示す。空間分布が同一の条件内で比較すると、実験 5 と同様に残響時間が長くなる程 LEV の評価が高くなっている。空間分布の違いを見ると、左右 ± 45 度の条件よりも、より広範囲に反射音到来方向が分布している ± 90 度の方が全体的に評価が高くなっている。しかし、 ± 90 度の条件でも、残響時間が 1.0 秒と短い場合は ± 45 度の 2.0 秒以上の条件より LEV の評価が下回る結果となっている。

図18 実験5の心理尺度値

図19 実験6の心理尺度値

実験 5 の各条件における側方エネルギー率 L_f 、後期側方反射音レベル LG 、Thiele の指向拡散度 d [11] の変化をそれぞれ図 20、図 21、図 22 に示す。なお、図 22 には積分区間を 80ms、300ms に限定した d もあわせて示した。これを見ると、初期の 80ms までの反射音に着目した指標 L_f や $d(80)$ の、RT による変化は小さい。一方 LEV の評価 (図 18) には、はっきり差が表れている。このことから、空間印象は初期反射音だけでなく、少なくとも 300ms 程度までの後部残響音を含めた反射音に影響を受けていると思われる。また、 LG 、 d などの指標は残響時間の変化と独立ではなく、残響時間が長くなるとこれらの値は共に大きくなる。すなわち、反射音の時間構造 (RT) と空間情報 (LG 、 d) は独立に扱えない。このことは、反射音の時間構造と空間情報の影響をそれぞれ定量化し、後で結合することによって LEV を評価することは困難であることを示している。LEV を評価する際には両者を統合的に扱って同時に定量化する必要があると考えられる。

受聴レベルの影響

受聴レベルを変化させた実験 7 の結果を図 23 に示す。これを見ると、受聴レベルが大きいほど LEV が大きくなり、実験 5 と同様に有意な差が認められる。実験 7 では、受聴レベルだけを変化させており、音場を特徴づける時間応答や空間情報は全て不変である。したがって、Bradley の実験結果 [4] と同様に時間応答や空間情報に加えて受聴レベルも LEV に影響を与えることが確認された。また、受聴レベルと反射音の直接音に対する相対的な時間構造や空間構造とは物理的には完全に独立したパラメータとして扱うことができる。このため、両者を独立に定量化し、後でその影響を結合することによって LEV を評価できる可能性がある。

図20 実験5における L_f 図21 実験5における LG 図22 実験5における d 値

図23 実験7の心理尺度値

6. 音に含まれた感じの定量化方法の検討

これまでの実験結果から LEV の物理指標が備えるべき必要条件について考察し、定量化方法について検討した。

6-1. LEV の物理指標の必要条件

今回の実験と以前筆者らが行った基礎実験 [8] (実験 A)、および Bradley が行った一連の実験の結果から導き出される知見を以下にまとめた。

反射音の到来方向の影響

- 側方から到来する反射音ほど LEV への寄与が大きい (実験 1)。
- 正面から到来する反射音の LEV への影響はゼロではない (実験 2)。

反射音の空間分布の影響

- 個々の反射音の LEV への寄与は他の反射音の到来方向に依存する (実験 2、3、4)。
- 反射音到来方向の空間分布が広範囲の場合に LEV が大きくなる (実験 A、6、Bradley)。
- 反射音到来方向の空間的バランスが良い場合に LEV が大きくなる (実験 2、3、4)。

反射音の時間分布の影響

- 直接音に対する反射音エネルギー比が大きくなると LEV が増す (実験 A、Bradley)。
- 直接音に対する反射音の遅れ時間が大きくなると LEV が増す (Bradley)。
- 残響時間が長くなると LEV は大きくなる (実験 5、6、Bradley)。

受聴レベルの影響

- 受聴レベルが大きくなると LEV も大きくなる (実験 7、Bradley)。
- これらの現象を説明できることが LEV の物理指標の必要条件と

考え、LEV 定量化方法について検討した。なお、鉛直方向の反射音の影響も考慮する必要があると思われるが、今回は水平面内に限定して検討する。また、受聴レベルは一定の条件とし、まずは反射音の直接音に対する相対的な時間、レベル、空間構造の定量化を検討することにした。

6-2. LEV の定量化方法

反射音の時間分布に関する知見 f、g、h の効果を同時に説明できる物理指標として EDT、Ts があげられる。EDT は反射音の時間的な変化やエネルギー的な変化に対して必ずしも連続に変化しない。また、数本の反射音によるシンプルな音場など EDT が計算できない場合がある。一方、Ts は反射音の時間的な変化や直接音対反射音エネルギー比の変化に対応して連続的に値が変化する。また、単一の反射音に対して適用できる指標であるため、ここでは Ts を用いて LEV の定量化を試みた。まず、Ts に対する個々の反射音の寄与を T_{si} として 6-1 式のように定義する。

$$T_{si} = \int_0^{\infty} t \cdot p_i^2(t) dt / \int_0^{\infty} p^2(t) dt \quad \cdots(6-1)$$

ここで、 $p(t)$ ：無指向性インパルス応答、 $p_i(t)$ ：方向 i より到来する反射音。

次に、知見 a、b から反射音の到来方向による LEV への寄与を考慮し T_{si} を 6-2 式のように補正する。

$$a_i = T_{si} \cdot (1 + \cos \theta_{Li}) / 2 \quad \cdots(6-2)$$

ここで、 a_i ：方向 i より到来する反射音のレベル、時間と方向のファクタ、 θ_{Li} ：両耳軸からの角度。また 6-2 式の $(1 + \cos \theta_{Li}) / 2$ は耳軸方向で最大となり、前後方向でゼロとならない変化となる。

次に、知見 c、d、e から反射音の空間分布の定量化を検討する。ここでは、知見 c の反射音の相互作用を定量化すれば、その 2 次的な帰結として知見 d、e が説明できると考えた。まず、2 つの反射音が作用しあうことをそれぞれの a_i を掛け合わせることで定量化する。その際、2 つの反射音の到来方向が角度的に互いに離れている程 LEV への寄与は大きいとした。さらに、ある反射音の LEV への寄与は他の全ての反射音の影響を受けるため、他の反射音との相互作用を全て積分することにした。これらを 6-3 式のように表わす。

$$b_i = a_i \cdot \sum_{j=0}^n a_j \cdot \sin(\theta_{ij} / 2) \quad \cdots(6-3)$$

ここで b_i は反射音 $p_i(t)$ の LEV への寄与、 θ_{ij} は到来方向 i と j 間の角度。

最後に、6-4 式のように全反射音の b_i を積分して LEV への総合的な寄与 SBTs (Spatially Balanced Ts) とする。

$$SBTs = \sqrt{\sum_{i=0}^n b_i} = \sqrt{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n a_i \cdot a_j \cdot \sin(\theta_{ij} / 2)} \quad \cdots(6-4)$$

このように全反射音の相互作用を総当たりで定量化することの 2 次的な帰結として、知見 d と e を説明できる。インパルス応答が同一の場合、反射音到来方向が広範囲で個々の反射音の T_{si} が空間的にバランス良く分布しているときに SBTs は大きくなる。

前述のように、反射音の時間構造と空間情報は独立ではないため、SBTs では両者を別々に扱うのではなく、反射音の時間、レベル、到来方向さらには反射音間の相互作用などを不可分なものとして統合的に扱っている。SBTs は、反射音エネルギーの空間的なバランスを考慮して時間重心 Ts を拡張したものと考えられることもできる。

実音場の SBTs を求めるには、 T_{si} を測定する必要がある。筆者らが用いている正四面体頂点法[12]などの仮想音源測定手法を用いれば初期応答における個々の反射音の T_{si} を測定することができる。また指向性マイクロホンを用いて後部残響部までの方向別インパルス応答を測定することで SBTs を求めることもできる。この場合、マイクロホンの指向性が理想的なら $Ts = \Sigma T_{si}$ となる。しかし、通常の指向性マイクロホンでは測定方向間でクロストークが生じるため $Ts < \Sigma T_{si}$ となる。したがって、通常は $Ts / \Sigma T_{si}$ を各方向の T_{si} に乗じてクロストークの影響を補正することによって近似的に T_{si} を求めることが可能である。

6-3. 各実験の心理尺度値と SBTs の対応

実験 1 から 6 で用いた各音場における SBTs を心理実験結果と併せてそれぞれ図 24～図 29 に示す。これらをみると、SBTs の変化が LEV の心理尺度値の変化と良く対応しているのがわかる。特に、既存の物理指標では定量化できなかった実験 2、3、4 における反射音の相互作用の影響が SBTs の値の変化に現われている。また、表 2 に示した各実験における SBTs と LEV の心理尺度値の相関係数をみると、両者の間に高い相関が得られていることがわかる。

以上の結果から、反射音エネルギーと時間のパラメータを含んだ Ts を用い、反射音の相互作用を考慮して空間分布を定量化することで LEV を評価できる可能性が示された。

図24 実験1における SBTs と心理尺度値

図25 実験2における SBTs と心理尺度値

図26 実験3における SBTs と心理尺度値

図27 実験4における SBTs と心理尺度値

図28 実験5における SBTs と心理尺度値

図29 実験6における SBTs と心理尺度値

表2 SBTs と LEV 心理尺度値との相関係数

Experiment No.	Correlation Coef.
1	0.988**
2	0.942*
3	0.959*
4	0.967*
5	0.991**
6	0.974**

* $p < 0.01$ ** $p < 0.001$

7. まとめ

反射音の到来方向、空間分布、残響時間、受聴レベルが音に包まれた感じ (LEV) に及ぼす影響を7つの心理実験を行って調べた。その結果以下の知見が得られた。

- 1) 側方から到来する反射音ほど LEV への貢献が大きい。
- 2) 正面から到来する反射音の LEV への影響はゼロではない。
- 3) 反射音の LEV への寄与は他の反射音の到来方向に依存する。
- 4) 反射音到来方向の空間分布が広範囲の場合に LEV が大きくなる。
- 5) 反射音到来方向の空間的バランスが良い場合に LEV が大きくなる。
- 6) 残響時間が長くなると LEV は大きくなる。
- 7) 受聴レベルが大きくなると LEV も大きくなる。

これらの知見と以前筆者らが行った基礎的な心理実験[8]、および Bradley が行った一連の実験の結果[3,4]から導き出される知見を説明できることが LEV の物理指標の必要条件と考え、方向別の時間重心 T_s を用いて反射音の空間分布を定量化する指標として SBTs を提案した。SBTs は今回行った心理実験結果と良い相関を示した。今後は、鉛直方向の反射音や受聴レベルさらには反射音の周波数特性の影響などについて検討していくつもりである。

参考文献

- [1] Barron, M., Marshall, A.H., "Spatial impression due to early lateral reflections in concert halls; the derivation of a physical measure," *J. Sound and Vib.* 77(2), 211-232 (1981)
- [2] 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)
- [3] Bradley, J.S., Soulodre, G.A., "The influence of late arriving energy on spatial impression," *J. Acoust. Soc. Am.* 97(4), 2263-2271 (1995)
- [4] Bradley, J.S., Soulodre, G.A., "Objective measures of listener envelopment," *J. Acoust. Soc. Am.* 98(5), 2590-2597 (1995)
- [5] L. Beranek, *Concert and opera halls* (Acoustical Society of America, New York, 1996)
- [6] M. Morimoto and K. Iida, "A new physical measure for psychological evaluation of a sound field: Front/Back energy ratio as a measure for envelopment," *J. Acoust. Soc. Am.* 93, 2282 (1993)
- [7] H. Furuya, K. Fujimoto, Y. Takeshima, and H. Nakamura, "Effect of early reflections from upside on auditory envelopment," *J. Acoust. Soc. Jpn. (E)* 16, 97-104 (1995)
- [8] 羽入敏樹, 木村翔, 橋本修, "音による取り囲まれ方が空間印象に及ぼす影響," *日本音響学会講演論文集*, 823-824 (1996.9)
- [9] 新版 官能検査ハンドブック, 日科技連官能検査委員会編, 日科技連出版社 (1973)
- [10] M. Barron, "The subjective effects of first reflections in concert halls-The need for lateral reflections," *J. Sound Vib.* 15, 475-494 (1971)
- [11] Thiele, R., "Richtungsverteilung und Zeitfolge der Schallruckwürfe in Raumen," *ACUSTICA* 13, 291-302 (1952)
- [12] 関口克明, 木村翔, 羽入敏樹, 松本英一郎, "4 チャンネルマイクロホンシステムを用いた正四面体頂点法による室内音場の解析," *日本建築学会計画系論文報告集*, No. 414 (1990.8) p. 1-11

(1998年9月4日原稿受理, 1998年12月8日採用決定)