

みかけの音源の幅と第 1 波面の法則の関係*

森本政之**

(神戸大学工学部)

飯田一博***

(神戸大学自然科学研究科/松下通信工業(株))

(平成 4 年 5 月 9 日受付)

内容梗概 みかけの音源の幅 (ASW) の物理指標として, Lateral energy fraction (L_f) や両耳間相関度がよく知られている。本研究は, 反射音が第 1 波面の法則が成立する上限を越え, 音像が分離する場合にも, ASW の予測に, それらの物理指標が適用できるか否か, 聴感実験を行い検討した。その結果, 以下のことを明らかにした。法則が成立していない音場の ASW の予測に, 法則が成立している場合と同じように, それらの物理指標を適用することはできない。反射音が法則が成立する上限を越えた場合, その反射音の, 法則が成立する範囲に含まれる部分が ASW の形成に寄与し, その部分だけを考慮した L_f や両耳間相関度で ASW を予測することができる。

キーワード コンサートホール, 拡がり感, 第 1 波面の法則, みかけの音源の幅, 両耳間相関度, 側方エネルギー率

Concert hall, Broadening, The law of the first wave front, Auditory source width, Degree of interaural crosscorrelation, Lateral energy fraction

1. まえがき

音場の心理評価の重要な要因の一つに音の拡がり感がある。著者の一人は, 拡がり感として「みかけの音源の幅 (ASW: Auditory Source Width) と「音に包まれた感じ (Envelopment)」の二つの性質が存在し, 両者を同時に区別して知覚できることを示している¹⁾。それぞれの定義は, 「先行音 (直接音) の到来方向に先行音と時間的にも空間的にも融合して知覚される音像の大きさ」と「みかけの音源以外の音像によって, 聴き手のまわりが満たされている感じ」である。

従来, 拡がり感の研究では「Spatial Impression」や「Auditory Spaciousness」など様々な用語を用いて研究されているが²⁾, 実験条件から「みかけの音源の幅」と同じ音像の空間的性質であると考えられる。また, ASW の物理指標として, Lateral energy fraction (L_f)³⁾ や両耳間相関度^{4)~7)} が提案され, それぞれ, 側方からの反射音成分が多いほど, また両耳間相関度が低いほど, ASW は大きくなることがよく知られている。

しかしながら, 音源信号に定常ノイズを使用した場

合^{4), 5), 7)} には問題にならないが, 音源信号に音楽を使用した場合には, 音像形成に関係する第 1 波面の法則との関連が問題となる。例えば, 直接音が前方から到来した場合を考えると, 第 1 波面の法則が成立するということは, 後方から反射音が到来しても前方にだけ音像が生じていることを意味する。しかし, 後方からの反射音が豊富なコンサートホールや前方だけでなく後方にもスピーカを配置したサラウンドシステム等では, 直接音方向以外にもエコー障害とはならない音像が生じている場合がある。このような第 1 波面の法則が成立する上限を越える反射音が存在する場合でも, ASW が L_f や両耳間相関度で予測できるか否かは重要な問題である。しかし, Barron and Marshall³⁾ の論文では, 第 1 波面の法則が成立する範囲に限られており, また, Keet⁶⁾ の論文では全く触れられていない。

本研究では, 聴感実験を行い, まず, 第 1 波面の法則が成立する場合としない場合の ASW を比較し, 続いて, 法則が成立しない場合の ASW の予測方法について検討する。

なお, 本研究と類似の研究に, 反射音構造 (反射音の本数, 到来方向, 遅れ時間, 音圧レベル) と知覚される音像の大きさとの関係を検討した Wagener⁸⁾ の研究がある。その中では, 第 1 波面の法則が成立する確率と, 音像の大きさの関係について検討されている。しかし, 彼の場合の音像の大きさには, 先行音に融合した音像の

* Relation between auditory source width and the law of the first wave front.

** Masayuki Morimoto (Faculty of Engineering, Kobe University, Kobe, 657)

*** Kazuhiro Iida (Graduate School of Science and Technology, Kobe University, Kobe 657/Matsushita Communication Industrial Co., Ltd., Yokohama, 226)

大きさだけでなく、分離した音像の大きさも含まれており、前述の定義から明らかなように本研究で検討する ASW とは異なるものである。

2. 第1波面の法則が成立する場合としない場合の ASW の比較

2.1 実験 Ia: 法則が成立する範囲としない範囲の決定

本実験は、次の実験 Ib の条件である、法則が成立する範囲（音像が分離しない範囲）と成立しない範囲（音像が分離する範囲）を求め、同時に実験 Ib に適した被験者を選ぶための予備実験である。

2.1.1 実験方法

A. 音源信号

音源信号として、音楽用シンセサイザ (Roland JX-3P) のフルート音を自動演奏させた、J.S. バッハの無伴奏フルートパルティータ (J.S. Bach; Partita a-mol für flute allein BWV 1013) の最初から約7秒である。この曲はすべて同じ長さの音符 (16 分音符) から構成されており、被験者が音像の分離を判断し易いように選んだ。

B. 刺激として用いた音場

Fig. 1 は、刺激として使用した音場のインパルス応答とスピーカ配置を示している。音場は、直接音と単一反射音から成る音場である。直接音と反射音の音圧レベルは等しく、反射音の直接音からの遅れ時間は Δt ms である。スピーカの高さは被験者の耳軸を含む水平面内で、被験者の頭の中心までの距離は 1.5 m である。直接音用スピーカを正面に、反射音用スピーカを左側方 135° に配置した。現実には、最初の反射音が斜め後方から到来することはまれであるが、音像の分離が生じた場合に、被験者が判断し易いように配置した。なお、使用したスピーカは円筒型 (直径: 108 mm, 長さ: 350 mm) で、その周波数特性は 80 Hz ~ 10 kHz の範囲において ± 4 dB 以内で平坦になるように周波数イコライザ (Technics SH-9090) を用いて補正した。

反射音の遅れ時間 Δt ms は、デジタル遅延装置 (YAMAHA YDM-2600) で変化させた 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 ms の 8 種類である。この範囲で、

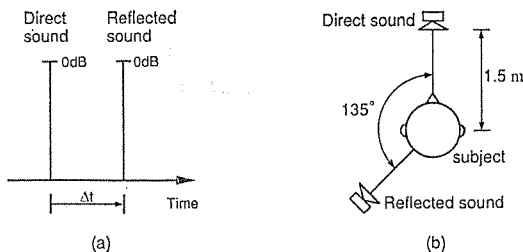


Fig. 1 Impulse response of stimulus (a) and loudspeaker arrangement (b) used in Exp Ia.

音像が分離する場合と、分離しない場合が起こることを、あらかじめ聴試し確認した。直接音と反射音の音圧レベルはともに等しく、それぞれ被験者の頭の中心に相当する位置において 69 dBA (時定数: slow, RMS の最大値) である。

C. 刺激の提示方法と回答方法

実験は無響室内で行った。同じ遅れ時間の刺激を 1 秒おきに 3 回ずつ提示したものを 1 試行とした。被験者には、この 1 試行の 1 回目は刺激を聴くだけ、2 回目を聴いた後回答を記入、3 回目で確認、このとき必要なら訂正するように指示した。試行と試行の間隔は 7 秒である。8 種類の刺激を各 3 試行ずつ計 24 試行をランダムに提示した。1 回の実験時間は約 13 分である。1 人の被験者につき 2 回実験した。すなわち 1 人の被験者当たり同一刺激に対して 6 個の回答が得られた。なお、実験に先立ち、 Δt が 10 ms と 80 ms の両極端な場合を各被験者に数度聴かせ、次に述べる回答方法に慣れさせた。

回答方法として、被験者が反射音方向に過度の意識を向けるのを避けるため、マッピング法⁹⁾を用いた。回答用紙には円が描かれており、被験者には音像の到来方向とその範囲を回答用紙に記入させた。もし、音像が分離し、複数個生じた場合には、同じ回答用紙の上にそれらの到来方向と範囲をすべて記入させた。なお、実験中椅子に座った被験者の頭は固定し、回答に必要な明かりを残して他の照明はすべて消した。

D. 被験者

被験者は 22 ~ 25 歳の男子学生 12 名である。

2.1.2 実験結果

まず、得られた回答から、各被験者ごと各遅れ時間に対して音像が分離する百分率を求めた。その結果から、この実験条件の範囲で、法則が成立する範囲としない範囲が明確に現れる 5 名を選んだ。この 5 名の被験者を対象に再度同じ実験を繰り返し、同様の結果が得られることを確認した。

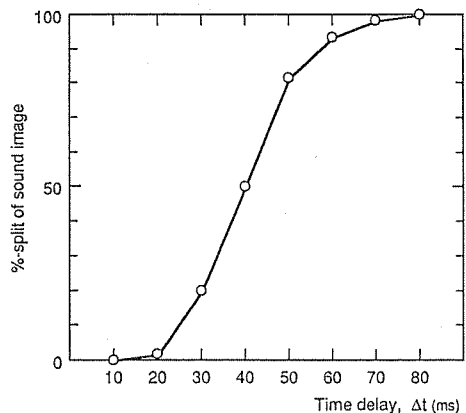


Fig. 2 %-split of sound image as a function of time delay of a reflection.

Fig. 2 は 5 名に対する 2 回の実験結果を一つにまとめて示したものである。法則が成立し音像が分離しない確率は、 $\Delta t=10\text{ms}$ で 100%， 20ms で 98.3%，逆に法則が成立しない音像が分離する確率は、 $\Delta t=70\text{ms}$ で 98.3%， 80ms で 100% であることを示している。

以上の結果から、実験 Ib で用いる刺激の遅れ時間、 Δt として、10, 20, 70, 80 ms の 4 種類、被験者として、この 5 名を選ぶことにした。

2.2 実験 Ib: 法則が成立する場合としない場合の ASW の比較実験

2.2.1 実験方法

A. 音源信号

実験 Ia と同じ音源信号を用いた。

B. 刺激として用いた音場

スピーカ配置は実験 Ia と同じである。刺激として使用した音場のインパルス応答を Fig. 3 に示す。実験 Ia の結果から選んだ 4 種類と比較のために加えた 2 種類の計 6 種類である。

刺激 (a) と (b) は法則が成立する範囲すなわち音像が分離しない刺激、刺激 (c) と (d) は法則が成立しない範

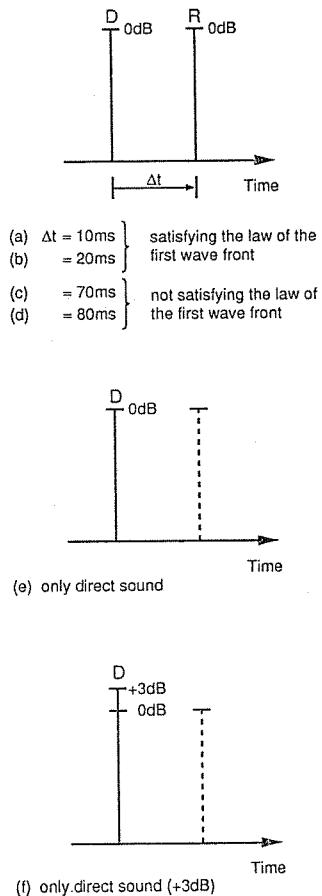


Fig. 3 Impulse responses of six stimuli used in Exp Ib.

囲すなわち音像が分離する刺激である。刺激 (e) は刺激 (a)~(d) の音場から反射音を除いた直接音だけの音場、刺激 (f) は反射音がある場合の刺激 (a)~(d) と音圧レベルが等しくなるように刺激 (e) の音圧レベルを 3 dB 大きくした音場である。

Table 1 は、各刺激の直接音と反射音を合わせた全体の音圧レベルを示している。被験者の頭の中心に相当する位置において、時定数を Slow として測定した RMS 最大値 (dBA) である。

C. 刺激の提示方法と回答方法

実験は無響室内において一対比較法を用いて行った。6 種類の刺激から任意に 2 種類を選び刺激対とした。刺激と刺激の間隔は 1 秒、対と対の間隔は 6 秒である。対の組み合わせ順序が逆のものも含めて 30 対をランダムに提示した。1 回の実験時間は約 11 分である。各被験者につき実験を十分な休憩をはさみながら 4 回実施した。すなわち、被験者 1 人につき一つの刺激対に対して 8 個の回答を得た。

被験者にはどちらの刺激の ASW がより大きいか手元のスイッチで回答させた。なお、実験中椅子に座った被験者の頭は固定し、回答に必要な明かりを残して他の照明はすべて消した。

D. 被験者

被験者は実験 Ia の結果を基に選んだ 5 名である。

2.2.2 実験結果と考察

得られた回答から、Thurstone¹⁰⁾ のケース V に従って、Gulliksen¹¹⁾ の不完備法を用いて ASW の心理的距離尺度を構成した。結果を Fig. 4 に示す。なお、得られた結果は、Mosteller¹²⁾ の適合度検定の結果、正規分布の仮定に適合していた。図の縦軸の尺度の 1 単位は $\sqrt{2}\sigma$ (σ は各刺激に対する弁別過程が正規分布すると仮定したときの標準偏差) である。

音圧レベルが低い直接音だけの刺激 (e) は、他のすべての刺激よりも ASW が小さいという回答であったため、尺度値を求めることができなかった。

まず、第 1 波面の法則が成立する範囲、すなわち音像が分離しない刺激 (a) と (b) ($\Delta t=10\text{ms}$ と 20ms) を比較すると、尺度値の差は 0.16 である。これは、 $\Delta t=10\text{ms}$ の ASW の方が大きいと回答する確率が 56%、 $\Delta t=20\text{ms}$ の同様の確率が 44% であることを意味している。一般には、一方が 75% 以上の確率で起これば弁別できると見なせることから、 $\Delta t=10\text{ms}$ と 20ms の間には弁別できるだけの ASW の差がないと言える。

同様に、法則が成立しない範囲すなわち音像が分離す

Table 1 Sound pressure level of stimulus used in Exp. Ib (dBA).

Stimulus	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
SPL	70.5	71.7	71.6	71.8	69.0	72.0

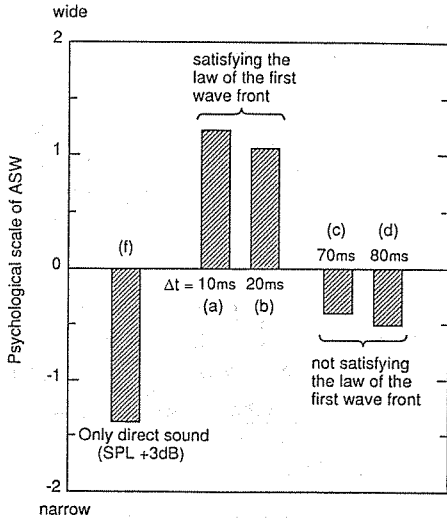


Fig. 4 Psychological scale of ASW relating to the law of the first wave front.

る刺激(c)と(d) ($\Delta t = 70\text{ ms}$ と 80 ms)を比較すると、尺度値の差は0.10である。これは、 $\Delta t = 70\text{ ms}$ のASWの方が大きいと回答する確率が54%、 $\Delta t = 80\text{ ms}$ の同様の確率が46%であることを意味している。この場合も前述の理由から、両者のASWに差がないと見なせる。

次に、法則が成立する場合((a)と(b))と成立しない場合((c)と(d))を比較すると、前者の方が平均値で1.59大きい。これは、前者のASWの方が大きいと回答する確率が94%、後者の同様の確率が6%であることを意味している。すなわち、法則が成立する(音像が分離しない)場合の方が成立しない(音像が分離する)場合よりもASWが大きいと言える。

四つの刺激(a), (b), (c), (d)は反射音の到来方向及び直接音に対する相対レベルが等しいことから、従来ASWの物理指標と言われている、 L_r や両耳間相関度は等しい。従って、ここで得られた結果は、反射音が第1波面の法則を満足しない場合には、ASWの予測にそれらの物理指標を、法則を満足する場合と同じようには適用することができないことを示している。

しかし、法則が成立しない場合(刺激(c)と(d))のASWの平均値と、Table 1から刺激(c)と(d)と刺激の音圧レベルが等しいと見なせる刺激(f)のASWを比較すると、前者の方が0.92大きい。これは、前者のASWの方が大きいと回答する確率が82%、後者の同様の確率が18%であることを意味している。すなわち、法則が成立しない場合でも音圧レベルの等しい直接音だけよりもASWが大きいと言える。このことは、反射音が第1波面の法則を満足しない場合でも、部分的に側方反射音としてASWの形成に寄与していることを示唆している。

3. 第1波面の法則が成立しない場合のASWの予測方法の検討

第1波面の法則を満足しない反射音が形成するASWの大きさについて、一つの仮説を立て、聴感実験により検証する。

3.1 仮説

Fig. 5は、直接音Dによる第1波面の法則が成立する範囲の上限(破線)と、それを越える反射音Rを示している。この場合、実験Ibの結果から考えられる最も直感的な仮説は以下のとおりである。「反射音Rの、第1波面の法則の成立する範囲に含まれる部分(图中一点鎖線)が、側方反射音としてASWの形成に寄与する。」

3.2 実験方法

3.2.1 実験IIa: 法則が成立する上限値

単一反射音の遅れ時間を固定し、直接音に対する相対レベルを変化させ、法則が成立する反射音レベルの上限値を求める。

A. 音源信号

実験Iaと同じ音源信号を用いた。

B. 刺激として用いた音場

Fig. 6にインパルス応答とスピーカ配置を示す。反射音の遅れ時間は80msに固定。直接音の音圧レベルは被験者の頭の中心に相当する位置で69dBa(時定数: slow, RMSの最大値)一定である。反射音の直接音に対する相対音圧レベル ΔL_{sp} (dB)は、-5dB~-15dBを1dBステップで変化させた11種類である。

C. 刺激の提示方法及び回答方法

実験は無響室内で行った。刺激の提示方法及び回答方法は、実験Iaと全く同じである。11種類の刺激を各2

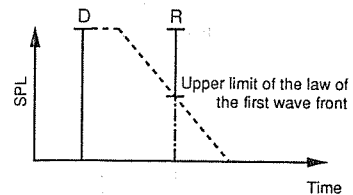


Fig. 5 Schematic explanation of the hypothesis on ASW by a reflection not satisfying the law of the first wave front.

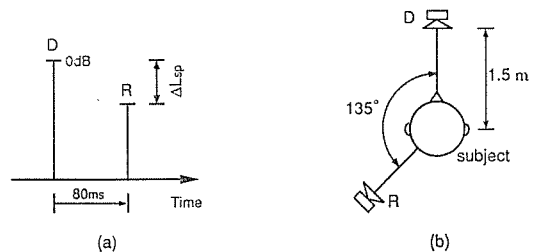


Fig. 6 Impulse response of stimulus (a) and loudspeaker arrangement (b) in Exp IIa.

試行ずつ計 22 試行をランダムに提示した。1 回の実験時間は約 11 分である。1 人の被験者につき十分な休憩をはさみながら 25 回実験した。すなわち 1 人の被験者当たり同一刺激に対して 50 個の回答が得られた。なお、実験中椅子に座った被験者の頭は固定し、回答に必要な明かりを残して他の照明はすべて消した。

D. 被験者

被験者は 22~25 歳の男子学生 3 名である。ただし、実験 Ia, Ib の被験者とは異なる。

3.2.2 実験 II b 法則が成立しない場合の ASW

法則が成立しない場合の ASW と等しい ASW を生じる、法則が成立する範囲内の反射音の音圧レベルを求める。

A. 音源信号

実験 II a と同じ音源信号を用いた。

B. 刺激として用いた音場

スピーカ配置は実験 II a (Fig. 6 (b)) と同じである。Fig. 7 にインパルス応答を示す。Fig. 7 (a) は法則が成立しない場合で、反射音の遅れ時間は、80 ms、直接音との相対レベルは 0 dB と共に固定。Fig. 7 (b) は法則が成立する場合で、反射音の遅れ時間は 20 ms 固定。反射音の直接音に対する相対レベル ΔL_{asw} (dB) は、-5~-15 dB を 1 dB ステップで変化させた 11 種類である。

どちらの場合も、刺激の音圧レベルは、直接音と反射音を合わせたラウドネスが等しくなるように、KEMAR の両耳音圧レベルから Robinson¹³⁾ の両耳加算式によって求めた値を、71.4 dBA (時定数: Slow, RMS の最大値) 一定とした。

C. 刺激の提示方法と回答方法

実験は無響室内において一対比較法を用いて行った。法則が成立しない場合 (Fig. 7 (a)) と 11 種類の法則が成立する場合 (Fig. 7 (b)) の中から任意に 1 種類を選び刺激対とした。刺激と刺激の間隔は 1 秒、対と対の間隔は 5 秒である。まず、法則が成立する刺激を対の前にした 11 種類の対と、対の後にした 11 種類の対を作成した。実験は、それぞれ別々に行った。1 回の実験では、11 種類の対を各 5 回ランダムに提示した。1 回の実験時間は約 18 分である。各被験者につき十分な休憩をはさんで 5 回実験した。すなわち、被験者 1 人につき 1 種

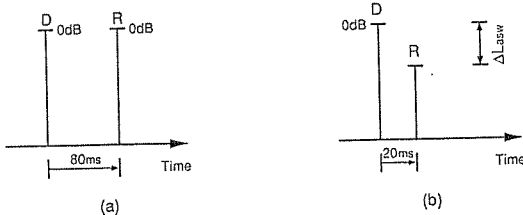


Fig. 7 Impulse responses of stimuli used in Exp IIb.

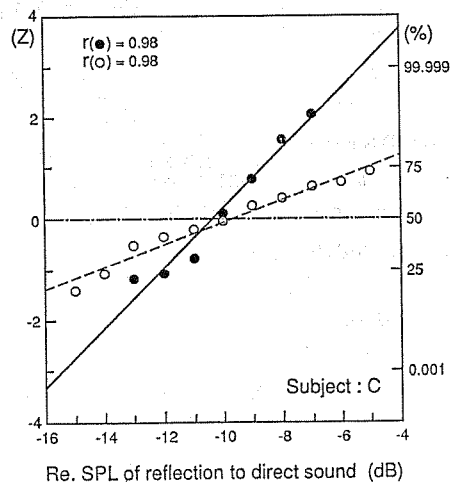
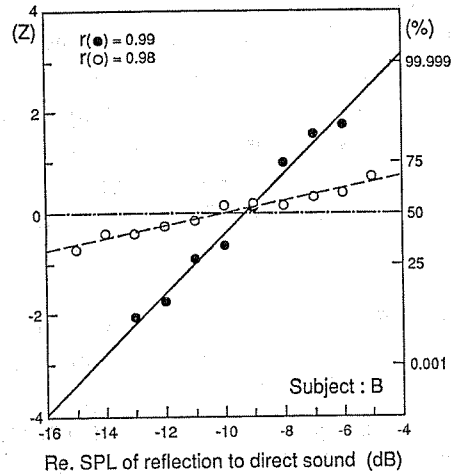
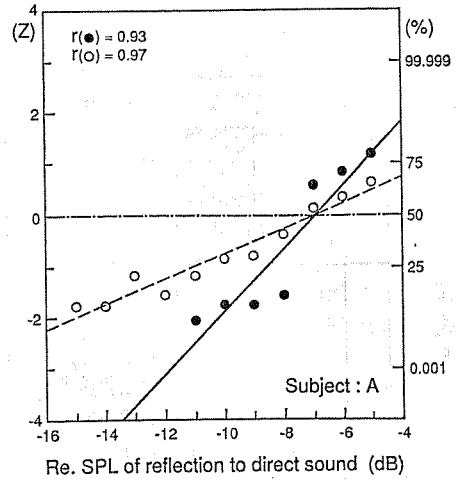


Fig. 8 Probability that a sound image splits (closed circle and solid line) and probability that ASW for stimulus satisfying the law of the first wave front is wider than ASW for a stimulus not satisfying the law (open circle and dotted line) for each subject.

類の刺激対に対して 50 個 (対の組み合わせ順序 (2) × 1 回の実験で提示される回数 (5) × 実験回数 (5)) の回答を得た。

被験者には前者の ASW と比較して後者の ASW が大きい小さいか回答させた。なお、実験中椅子に座った被験者の頭は固定し、回答に必要な明かりを残して他の照明はすべて消した。

D. 被験者

被験者は実験 IIa と同じ 22~25 歳の男子学生 3 名である。

3.3 実験結果と考察

まず、実験 IIa の回答から被験者ごとに音像が分離する百分率を求めた。また、実験 IIb の回答から、法則が成立しない場合の ASW より、法則が成立する場合の ASW が大きい百分率を求めた。更に、それらの百分率を Z 変換し、回帰直線を求めた。ただし、百分率が 0% 及び 100% となった回答は省いた。被験者ごとの結果を Fig. 8 に示す。

横軸は反射音の直接音に対する相対レベル、縦軸は左が Z 値を右が百分率を表している。図中、●と実線は実験 IIa の結果、○と破線は実験 IIb の結果である。図中に示した相関係数を見ると、いずれも 1.0 に近く、心理実験の結果が正規分布していることを意味している。

次に、それぞれの回帰式から平均値を求めた。実験 IIa の平均値 $\overline{\Delta L_{sp}}$ は、音像の分離する確率が 50% すなわち第 1 波面の法則が成立する上限値となる反射音の相対レベルを表している。また、実験 IIb の平均値 $\overline{\Delta L_{asw}}$ は、法則が成立する場合の相対レベル ΔL_{asw} の反射音による ASW と、成立しない場合の ASW が等しくなることを表している。言い換えると、法則が成立しない場合、反射音の $\overline{\Delta L_{asw}}$ に相当するエネルギーが側方反射音として ASW の形成に寄与していると見なせる。すなわち、ASW は反射音の遅れ時間に依存しないことが明らかにされているからである^{3), 14)}。

被験者ごとに求めた $\overline{\Delta L_{sp}}$ と $\overline{\Delta L_{asw}}$ を Table 2 に示す。被験者 A では両者の差は無く、最大でも被験者 B の 0.7 dB であり、両者は等しいと見なせる。

以上の結果は、「反射音の、第 1 波面の法則が成立する範囲に含まれる部分が、側方反射音として ASW の形成に寄与する」という仮説を支持している。従って、ASW を予測するためには、その部分だけを考慮して L_r や両耳間相関度を求める必要がある。

Table 2 Comparison of $\overline{\Delta L_{sp}}$ obtained in Exp IIa with $\overline{\Delta L_{asw}}$ obtained in Exp IIb (dB).

Subject	$\overline{\Delta L_{sp}}$	$\overline{\Delta L_{asw}}$
A	-7.0	-7.0
B	-9.3	-10.0
C	-10.3	-9.7

4. 結 論

反射音が第 1 波面の法則が成立する上限を越え、音像が分離する場合の、みかけの音源の幅 (ASW) の予測手法について、聴感実験を行い検討した。その結果、以下のことを明らかにした。

- (1) 反射音の到来方向及び直接音に対する相対レベルが等しくても、第 1 波面の法則が成立する上限を越える反射音が形成する ASW は、同法則の成立範囲内にある同じ音圧レベルの反射音が形成する ASW よりも、小さい。すなわち、第 1 波面の法則が成立していない音場の ASW の予測に、同法則が成立している場合と同じように、Lateral energy fraction や両耳間相関度を適用することはできない。
- (2) 反射音が第 1 波面の法則が成立する上限を越えた場合、その反射音の、第 1 波面の法則が成立する範囲に含まれる部分が ASW の形成に寄与する。従って、ASW を予測するためには、その部分だけを用いて、Lateral energy fraction や両耳間相関度を求める必要がある。

謝 辞

終始ご指導ご鞭撻いただきました前神戸大学工学部前川純一教授 (現、神戸大学名誉教授、前川純一環境音響研究所) に謝意を表します。同時に、本研究の実験に際してご協力いただいた本学学生、児島宏之君 (現、旭化成ホームズ) 及び村上隆久君 (現、新星和不動産) に感謝の意を表します。

文 献

- 1) 森本政之、藤森久嘉、前川純一、“みかけの音源の幅と音に包まれた感じの差異,” 音響学会誌 46, 449-457 (1990).
- 2) J. ブラウエルト、森本政之、後藤敏幸、空間音響 (鹿島出版会、東京、1986)、p. 168.
- 3) M. Barron and A. H. Marshall, "Spatial impression due to the early reflections in concert halls: The deviation of a physical measure," J. Sound Vib. 77, 221-232 (1981).
- 4) 穴沢健明、伊藤 毅、“両耳間相関度と拡がり感の関係について,” 音響学会電気音響研究 EA 70-13 (1970).
- 5) 黒住幸一、大串健吾、“2チャンネル音響信号の相関係数と音像の質,” 音響学会誌 34, 253-260 (1983).
- 6) W. de V. Keet, "The influence of early reflections on the spatial impression," 6th ICA Tokyo, E-2-4 (1968).
- 7) M. Morimoto and Z. Maekawa, "Effects of low frequency components on auditory spaciousness," Acustica 66, 190-196 (1988).
- 8) von B. Wagener, "Räumliche Verteilungen der Hörrichtungen in synthetischen Schallfeldern," Acustica 25, 203-219 (1971).
- 9) J. ブラウエルト、森本政之、後藤敏幸、空間音響 (鹿島出版会、東京、1986)、p. 86.
- 10) L. L. Thurstone, "A law of comparative judgement," Psychol. Rev. 35, 273-286 (1927).
- 11) H. Gulliksen, "A least squares solution for paired comparison with incomplete data," Psychometrika 21, 125-134 (1956).
- 12) F. Mosteller, "Remarks on the method of paired comparisons: I, II, III," Psychometrika 16, 3-9, 203-206, 207-218 (1951).
- 13) D. W. Robinson and L. S. Whittle, "The loudness of directional sound field," Acustica 10, 74-80 (1960).
- 14) M. Morimoto and Ch. Pössl, "Contribution of reverberation to auditory spaciousness in concert halls," J. Acoust. Soc. Jpn. (E) 10, 87-92 (1989).