

平面ディスプレイと音響反射板を用いた音像生成方式における 視覚的遮蔽問題の回避を目指した新形状の提案

A New Speaker Setup for Avoiding Visual Occlusion

in Sound Image Production Method using Flat Display and Acoustic Barriers

山下 春香† 片桐 滋† 大崎 美穂†
Haruka Yamashita Shigeru Katagiri Miho Ohsaki

1. はじめに

テレビ会議システムが普及する中で、t-Room [1]のように大型ディスプレイを用いて人の全身を投影し、高い臨場感の実現を目指した遠隔コラボレーション支援システムの研究が行われている。このようなシステムでは、スピーカ位置の制約などの原因によって、ディスプレイに映る発話者の声が、口元以外の位置から聞こえることがある。こういった視覚情報と聴覚情報の不一致のために、臨場感が低下してしまうことが問題として挙げられる。我々はこうした問題の解決を目指し、平面ディスプレイと音響反射板を用いた音像生成方式 [2] (以下、音響反射板方式) に着目し、研究を行ってきた。文献 [3]において、音響反射板方式を用いた 1 つの音像に対し受聴実験を行い、定位精度を確認した。文献 [4]においては固定された発話者の映像を、[5]においては移動する発話者の映像をそれぞれ用いた受聴実験を行い、音像に対する視覚情報の影響を調査した。しかしながら、この方式の問題点として、音響反射板に囲まれたスピーカセットをディスプレイの左右に配置するため、角度によってディスプレイの一部が遮蔽されることが挙げられる。このため、映像内の発話者がディスプレイの端に映っているなどの際に、受聴位置によっては発話者が見えなくなるなど臨場感が妨げられる場合がある。また、t-Roomのようにディスプレイを複数枚繋いで使用する場合に、空間的な制約があり、設置が困難になるということも問題として挙げられる。

本稿ではこの問題を解決するために、ディスプレイを遮蔽しない構造の反射板形状およびスピーカ位置を検討、提案し、その効果を確認するため提案形状に対して境界要素法を用いた数値シミュレーションを行い、この提案方式の性能の調査を行った。さらに、標準的な 2 スピーカステレオ方式、従来型音響反射板方式に対しても同様にし、結果を比較した。なお、音像定位は方向知覚や広がり知覚、距離知覚など複数の要素で構成されるが、本稿では音像の方向知覚を音像定位と定める。

2. 従来型音響反射板方式

従来型音響反射板方式の概観を Fig. 1 に示す。本方式では、65 インチなどの大型ディスプレイを縦向きに置いて用いる。これは、利用者の等身大映像を再生可能にするような遠隔コラボレーション支援システムでの利用を想定しているためである。

本方式のハードウェアは、縦向きに置いた液晶ディスプレイの左右に薄型平面スピーカを上・中・下段の 3 対、計 6 つを向かい合わせで取り付け、その背面と側面を覆うよう

に L 字型の剛体 (以下、音響反射板) を設置することで構成される。6 つのスピーカの音圧レベルを制御することにより、ディスプレイ面上の任意の位置に音像を定位させることを目的とする。

本方式では、スピーカの向きと音響反射板により前面に向かう音が抑制され、ディスプレイ面で反射することによって、ディスプレイ面上から音が出ているかのような感覚を得ることを目指している。また、各スピーカからの距離が等しくない受聴者に対しては、遠方スピーカから直接音、近方スピーカから回折音が届く。これにより、左右のスピーカからくる信号の到達時間差および到達音圧レベル差が軽減され、受聴者が正確な音像を知覚することを狙っている。

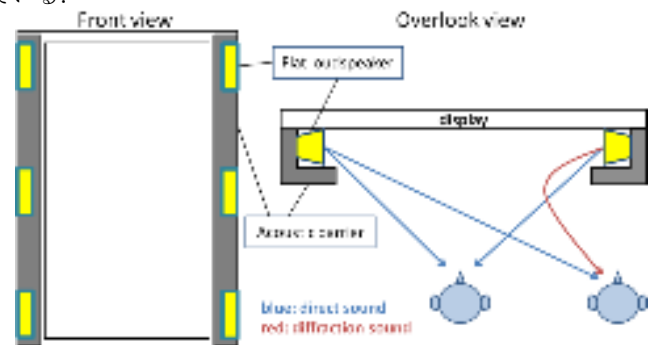


Fig. 1 Sketch of acoustic-barrier-based sound image production system.

3. 数値シミュレーション

3.1 境界要素法の凹型への適用[1]

Fig. 1 中の右図からわかるように、音響反射板方式を構成する平面ディスプレイとスピーカセットでもある音響反射板とは凹型の形状をなす。これは、本稿で提案する方式、すなわち音響反射板をディスプレイの上下に設置する方式にも共通である。しかしその一方で、音場の解析に用いる境界要素法は、そのままではこうした凹型形状の解析領域には不向きである。この問題を克服するため、次に述べるようなアプローチを採用した。

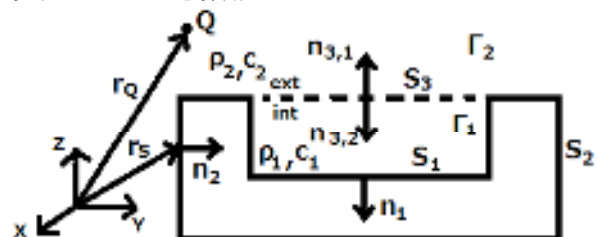


Fig. 2 Splitting the boundary of the concave model.

$$C_Q p_Q + \int_{S_1+S_3} \left(\frac{\partial \psi}{\partial \mathbf{n}} p_{S_1+S_2} - \psi \frac{\partial p_{S_1+S_3}}{\partial \mathbf{n}} \right) dS = C_Q p_Q + \int_{S_1} \left(\frac{\partial \psi}{\partial \mathbf{n}_1} p_{S_1} + j\omega \rho_1 \psi v_{S_1} \right) dS + \int_{S_3} \left(\frac{\partial \psi}{\partial \mathbf{n}_{3,1}} p_{S_3}^{\text{int}} + j\omega \rho_1 \psi v_{S_3}^{\text{int}} \right) dS = 0 \quad (1)$$

$$C_Q p_Q + \int_{S_2+S_3} \left(\frac{\partial \psi}{\partial \mathbf{n}} p_{S_2+S_3} - \psi \frac{\partial p_{S_2+S_3}}{\partial \mathbf{n}} \right) dS = C_Q p_Q + \int_{S_2} \left(\frac{\partial \psi}{\partial \mathbf{n}_2} p_{S_2} + j\omega \rho_2 \psi v_{S_2} \right) dS + \int_{S_3} \left(\frac{\partial \psi}{\partial \mathbf{n}_{3,2}} p_{S_3}^{\text{ext}} + j\omega \rho_2 \psi v_{S_3}^{\text{ext}} \right) dS = 0 \quad (2)$$

まず、解析領域を Fig. 2 のように 2 つの小領域に分け、境界 S_1 , S_2 , S_3 を定める。また、内部領域 Γ_1 、外部領域 Γ_2 を定め、それぞれ媒質密度を ρ_1 と ρ_2 、音速を c_1 と c_2 とする。使用する角周波数は ω 、観測点 Q における音圧は p_Q とする。

このとき境界積分方程式は、内部領域 Γ_1 において(1)式、内部領域 Γ_2 において(2)式のように書き換えられる。ただし、 p_{Si} と v_{Si} はそれぞれ i 番目の境界における音圧および粒子速度、基本解には $\psi = e^{-jk_r} / 4\pi r$ を用い、 r は Q と境界上の点との距離で $r = |\mathbf{r}_S - \mathbf{r}_Q|$ である。

ここで選点法を行い、(1)式と(2)式をそれぞれ(3)式と(4)式のように書き換える。

$$\mathbf{A}_{S_1} \mathbf{p}_{S_1} + \mathbf{A}_{S_3}^{\text{int}} \mathbf{p}_{S_3}^{\text{int}} - \mathbf{B}_{S_1} \mathbf{v}_{S_1} - \mathbf{B}_{S_3}^{\text{int}} \mathbf{v}_{S_3}^{\text{int}} = 0 \quad (3)$$

$$\mathbf{A}_{S_2} \mathbf{p}_{S_2} + \mathbf{A}_{S_3}^{\text{ext}} \mathbf{p}_{S_3}^{\text{ext}} - \mathbf{B}_{S_2} \mathbf{v}_{S_2} - \mathbf{B}_{S_3}^{\text{ext}} \mathbf{v}_{S_3}^{\text{ext}} = 0 \quad (4)$$

ただし、 \mathbf{p}_{Si} と \mathbf{v}_{Si} は、それぞれの節点における音圧と粒子速度のベクトルである。また、 \mathbf{A} , \mathbf{B} は影響係数行列であり、各要素は(5)式と(6)式によって計算される。

$$a_{l,m} = \begin{cases} \int_{S_m} \frac{\partial \psi(\mathbf{r}_l, \mathbf{r}_m)}{\partial \mathbf{r}_l} dS & (l \neq m) \\ 1/2 & (l = m) \end{cases} \quad (5)$$

$$b_{l,m} = -j\omega \rho_k \int_{S_m} \psi(\mathbf{r}_l, \mathbf{r}_m) dS \quad (6)$$

ここで N を境界の要素数とすると $l=m=1, 2, \dots, N$, $k=1, 2$ である。

次に(3)式と(4)式の未知数を右辺に集めると、(7)式と(8)式のように書ける。

$$\mathbf{A}_{S_1} \mathbf{p}_{S_1} + \mathbf{A}_{S_3}^{\text{int}} \mathbf{p}_{S_3}^{\text{int}} - \widehat{\mathbf{B}}_{S_1} \widehat{\mathbf{v}}_{S_1} - \mathbf{B}_{S_3}^{\text{int}} \mathbf{v}_{S_3}^{\text{int}} = -\overline{\mathbf{B}}_{S_1} \overline{\mathbf{v}}_{S_1} \quad (7)$$

$$\mathbf{A}_{S_2} \mathbf{p}_{S_2} + \mathbf{A}_{S_3}^{\text{ext}} \mathbf{p}_{S_3}^{\text{ext}} - \widehat{\mathbf{B}}_{S_2} \widehat{\mathbf{v}}_{S_2} - \mathbf{B}_{S_3}^{\text{ext}} \mathbf{v}_{S_3}^{\text{ext}} = \overline{\mathbf{B}}_{S_2} \overline{\mathbf{v}}_{S_2} \quad (8)$$

ただし、 $\widehat{\mathbf{v}}_{Si}$ と $\overline{\mathbf{v}}_{Si}$ はそれぞれ未知および既知の粒子速度ベクトルであり、 $\widehat{\mathbf{B}}_{Si}$ と $\overline{\mathbf{B}}_{Si}$ は移項によって生成される影響係数ベクトルである。

Fig. 2 のように仮想境界 S_3 を定めると、次式が成り立つ。

$$\rho_1 p_{S_3}^{\text{int}} = \rho_2 p_{S_3}^{\text{ext}} \quad (9)$$

小領域 Γ_1 , Γ_2 がそれぞれ同じ媒質で満たされているとき $\rho_1 = \rho_2$ となり、(9)式は次のようになる。

$$p_{S_3}^{\text{int}} = p_{S_3}^{\text{ext}} = p_{S_3} \quad (10)$$

また、 $\mathbf{n}_{3,1} = -\mathbf{n}_{3,2}$ であるので、次式が成り立つ。

$$\frac{\partial p_{S_3}^{\text{int}}}{\partial \mathbf{n}_{3,1}} = -\frac{\partial p_{S_3}^{\text{ext}}}{\partial \mathbf{n}_{3,2}} \quad (11)$$

さらに、 $-j\omega \rho_1 v_{S_3}^{\text{int}} = j\omega \rho_2 v_{S_3}^{\text{ext}}$ より、次式が成立する。

$$-v_{S_3}^{\text{int}} = v_{S_3}^{\text{ext}} \quad (12)$$

(10)式、(12)式を、(7)式、(8)式に代入し行列表記すると、次式を得る。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}_{S_1} & 0 & \mathbf{A}_{S_3}^{\text{int}} & -\widehat{\mathbf{B}}_{S_1} & 0 & -\mathbf{B}_{S_3}^{\text{int}} \\ 0 & \mathbf{A}_{S_2} & \mathbf{A}_{S_3}^{\text{ext}} & 0 & -\widehat{\mathbf{B}}_{S_2} & \mathbf{B}_{S_3}^{\text{ext}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{p}_{S_1} \\ \mathbf{p}_{S_2} \\ \mathbf{p}_{S_3} \\ \widehat{\mathbf{v}}_{S_1} \\ \widehat{\mathbf{v}}_{S_2} \\ \mathbf{v}_{S_3}^{\text{int}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{\mathbf{B}}_{S_1} \overline{\mathbf{v}}_{S_1} \\ \overline{\mathbf{B}}_{S_2} \overline{\mathbf{v}}_{S_2} \end{bmatrix} \quad (13)$$

これを解いて、境界の音圧および粒子速度を求めることができる。

3.2 シミュレーション対象

提案形状は Fig. 3(a) に示したように、従来型音響反射板方式と同様に 65 インチ液晶ディスプレイを縦向きに置き、その上下に薄型平面スピーカを左・中央・右に向かい合わせで取り付け、その背面と側面を覆うように音響反射板を設置することで構成する。従来型音響反射板方式と、標準的な 2 スピーカステレオ方式（以下、標準的ステレオ方式）のモデルを Fig. 3(b)(c) に示し、これを比較対象とする。標準的ステレオ方式は、65 インチ液晶ディスプレイを縦向きに置き、その左右端にスピーカを設置する。なお、従来型音響反射板方式の概要は 2.1 節において示したとおりである。

3.3 設定条件

シミュレーション領域は三次元の自由空間とする。ディスプレイ面の中央を原点とし、それを通る水平面のうちディスプレイに垂直な面を x 方向、平行な面を y 方向としたとき、 $-0.5[\text{m}] \leq x \leq 2[\text{m}]$, $-1.5[\text{m}] \leq y \leq 1.5[\text{m}]$ の範囲で $0.01[\text{m}]$ の格子状に観測点を設けた。

境界の離散化には三角形要素を用い、要素の大きさの最大値は $0.08[\text{m}]$ とした。用いる正弦波の周波数は $250[\text{Hz}]$, $500[\text{Hz}]$, $1000[\text{Hz}]$ と定めた。

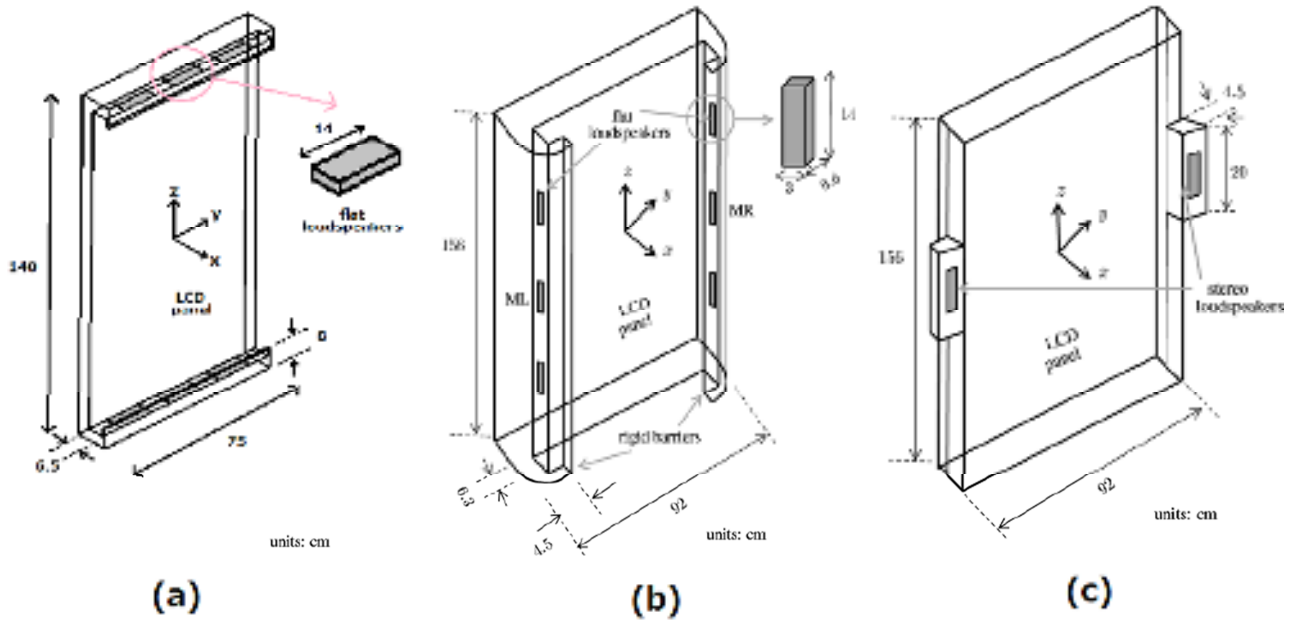


Fig. 3 Dimensional drawings of systems to be simulated: (a) proposed top-and-bottom acoustic-barrier-based system, (b) left-and-right acoustic-barrier-based system, and (c) standard 2-speaker system.

以上の条件を踏まえて、次に示す場合においてシミュレーションを行った。

(1) 中央の音像定位を想定する場合

(2) 片側に寄った音像定位を想定する場合

境界条件として、各場合における振動スピーカに該当する要素には粒子速度 $v_n = 1[\text{m/s}]$ を、それ以外には $v_n = 0[\text{m/s}]$ を与えた。振動スピーカは、(1)において、提案形状では中央の上下スピーカ、標準的ステレオ方式では左右スピーカ、従来型音響反射板方式では中段の左右スピーカとし、

(2)において、提案形状ではディスプレイ向かって左側の上下スピーカ、標準的ステレオ方式では左スピーカ、従来型音響反射板方式では中段左スピーカとした。

3.4 シミュレーション結果

シミュレーションにより算出された音圧は[dB]を単位とする SPL(Sound Pressure Level)に変換し、それを次の式により正規化した。

$$\text{SPL} = 20 \log_{10} \left\{ \frac{|p(Q)|}{|\max(p)|} \right\} \quad (14)$$

ここで、 $p(Q)[\text{Pa}]$ は観測点 Q における音圧であり、 $\max(p)$ は音圧 p の最大値である。

まず、「(1) 中央の音像定位を想定する場合」の結果を Fig. 4 から Fig. 6 に示す。ここで領域はディスプレイの中央を通る水平面を示している。結果を見ると、標準的ステレオ方式では各スピーカの周囲に同心円状の音圧分布が見られる。従来型音響反射板方式では、音響反射板の効果によってスピーカ周囲の同心円状に広がりや抑えられており、ディスプレイ面付近の音圧が高くなっていることが分かる。このことから、ディスプレイ面上から音が出ているように聞こえる効果が期待できる。一方で、提案形状では他の方式に見られるようなディスプレイ左右における同心円の傾向はなく、 x 軸上のスピーカからディスプレイ前方に向かって音が発せられているような音圧分布が見られる。このことから、提案形状でも従来型音響反射板と同様の効果が期待できると思われる。1k[Hz] において、提案形状では音圧

の山の形が他の周波数と異なるが、これは正弦波の波長の差により干渉する距離が短くなったためであると考えられる。

次に、ディスプレイ面から 1[m] 離れた地点である、シミュレーション領域における $x = 1[\text{m}]$ かつ $-0.75[\text{m}] \leq y \leq 0.75[\text{m}]$ を満たす範囲の観測点における音圧をグラフにしたものを Fig. 7 に示す。図中の横軸は $y[\text{m}]$ 、縦軸は音圧、青線、赤線、緑線はそれぞれ標準的ステレオ方式、従来型音響反射板方式、提案形状に対応する。グラフから、すべての形状でおおよそ左右対称な音圧分布が確認できる。標準的ステレオ方式において左右対称の精度が低いことについて、モデルの境界を要素に分割する際に対称性が失われたことが原因であると考えられる。また、各方式における音圧の差は正規化の際に生じたものである。

次に、「(2) 片側に寄った音像定位を想定する場合」の結果を Fig. 8 から Fig. 10 に示す。ここで領域はディスプレイの中央を通る水平面を示している。結果から、標準的ステレオ方式ではスピーカを中心に同心円状に音圧が分布しているが、従来型音響反射板方式および提案形状ではスピーカからの同心円状の拡散を抑え、スピーカとは左右逆方向の音圧が高くなる傾向が見られる。このことから、提案形状において複数組のスピーカを使用して音像を制御するとき、従来型音響反射板方式と同様に音像のずれを抑制することが期待される。

次に、ディスプレイ面から 1[m] 離れた地点である、シミュレーション領域における $x = 1[\text{m}]$ かつ $-0.75[\text{m}] \leq y \leq 0.75[\text{m}]$ を満たす範囲の観測点における音圧をグラフにしたものを Fig. 11 に示す。図中の横軸は $y[\text{m}]$ 、縦軸は音圧、青線、赤線、緑線はそれぞれ標準的ステレオ方式、従来型音響反射板方式、提案形状に対応する。

グラフからも、標準的ステレオ方式ではスピーカに近い方の音圧が高まり、従来型音響反射板方式および提案形状ではスピーカに近い方の音圧が弱められていることが分かる。

以上より、提案形状はディスプレイ付近の音圧を高め、またスピーカから音が同心円状に広がるのを抑制するとい

う点で従来型音響反射板方式の特性を引き継いでおり、受聴位置に関わらない音像定位精度が期待できると言える。

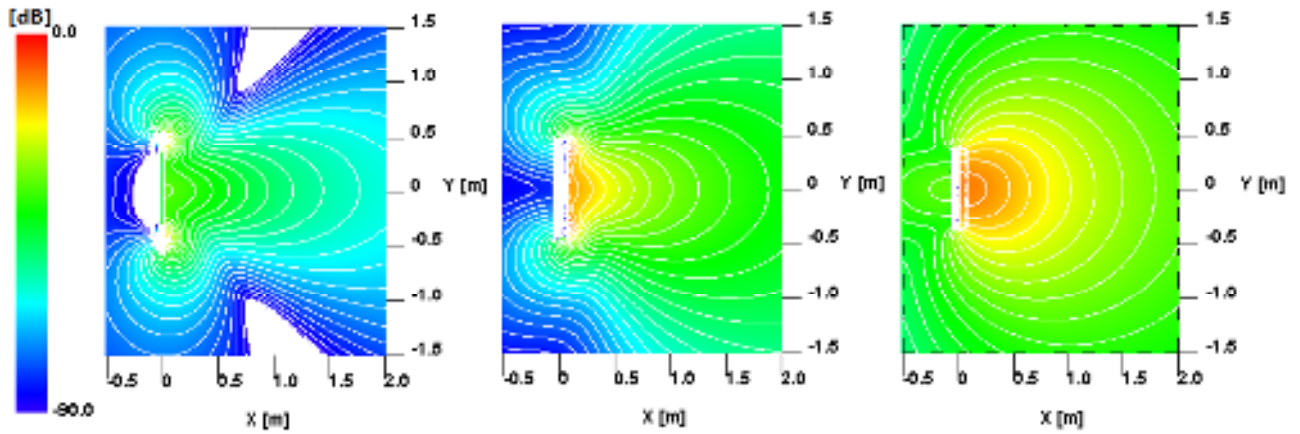


Fig. 4 Simulation results for 250 Hz sine wave and at center-height horizontal plane: standard 2-speaker system (left), left-and-right acoustic-barrier-based system (center), and proposed top-and-bottom acoustic-barrier-based system (right).

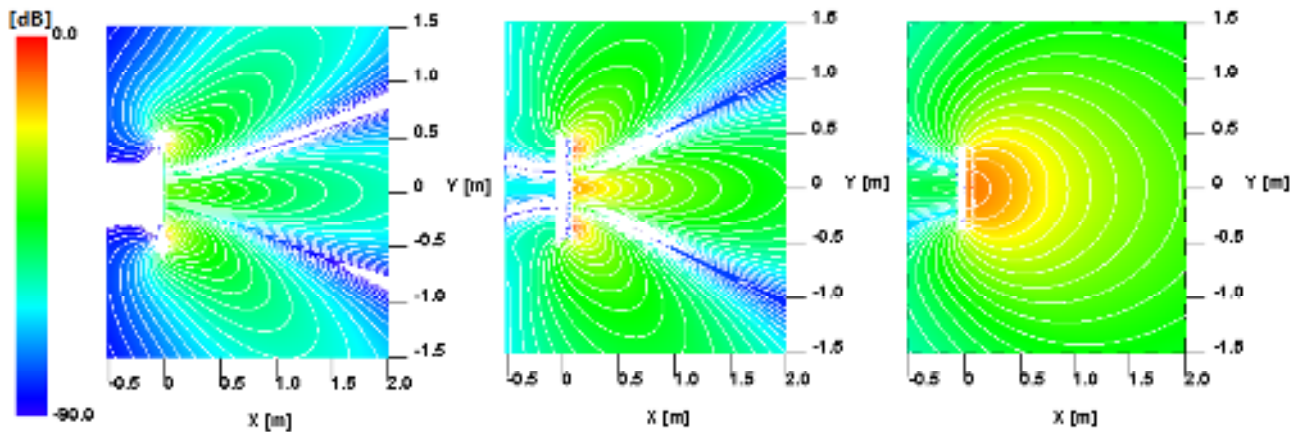


Fig. 5 Simulation results for 500 Hz sine wave and at center-height horizontal plane: standard 2-speaker system (left), left-and-right acoustic-barrier-based system (center), and proposed top-and-bottom acoustic-barrier-based system (right).

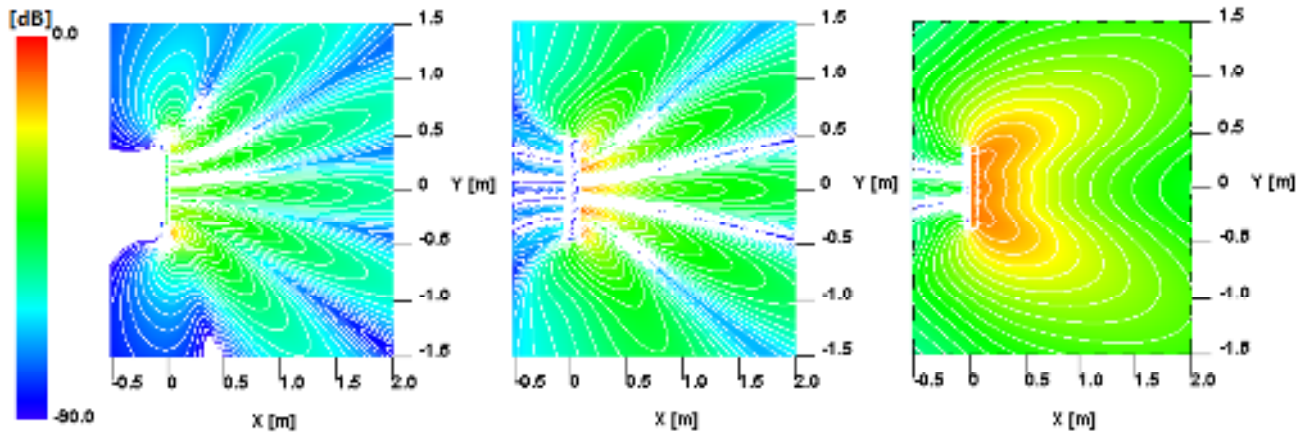


Fig. 6 Simulation results for 1 kHz sine wave and at center-height horizontal plane: standard 2-speaker system (left), left-and-right acoustic-barrier-based system (center), and proposed top-and-bottom acoustic-barrier-based system (right).

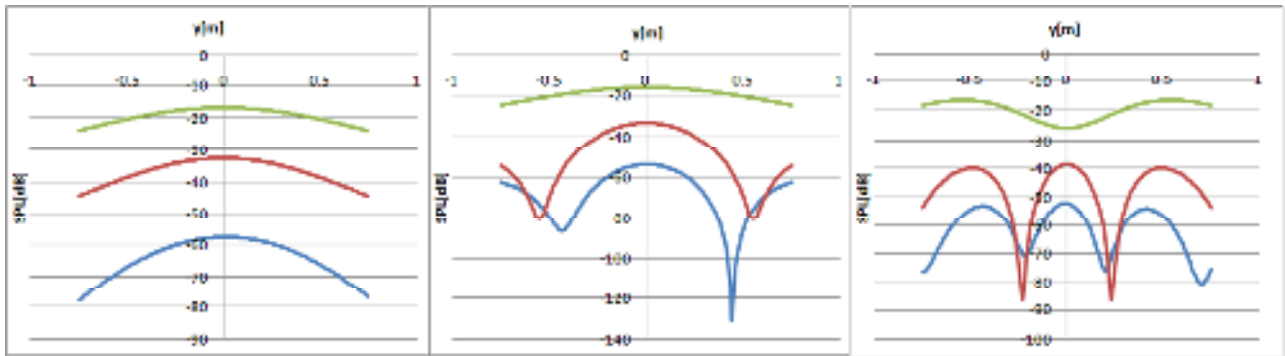


Fig. 7 Simulated SPL values at position of 1 m distant from display: for 250 Hz, for 500 Hz, and for 1 kHz.

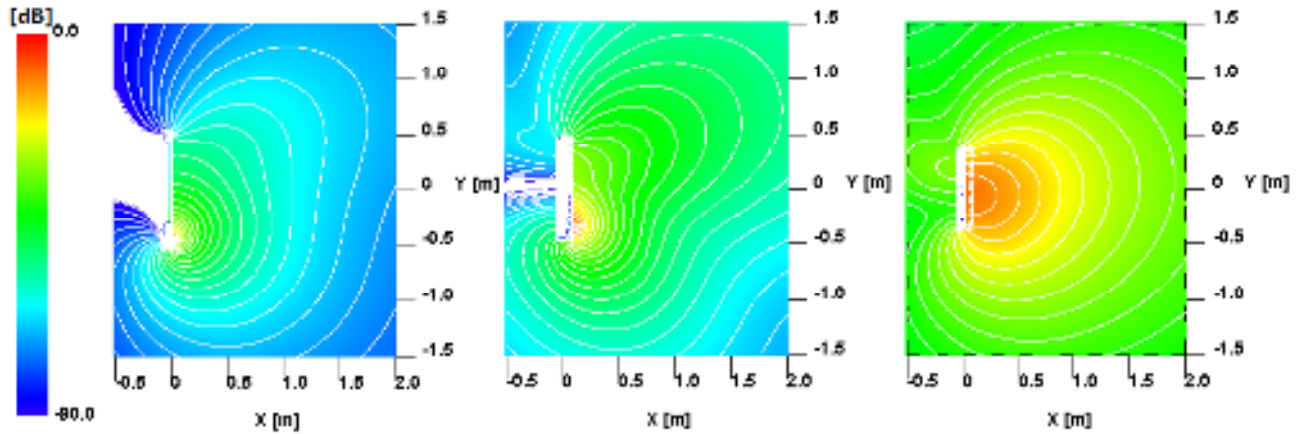


Fig. 8 Simulation results for 1 kHz sine wave and at center-height horizontal plane: standard 2-speaker system (left), left-and-right acoustic-barrier-based system (center), and proposed top-and-bottom acoustic-barrier-based system (right).

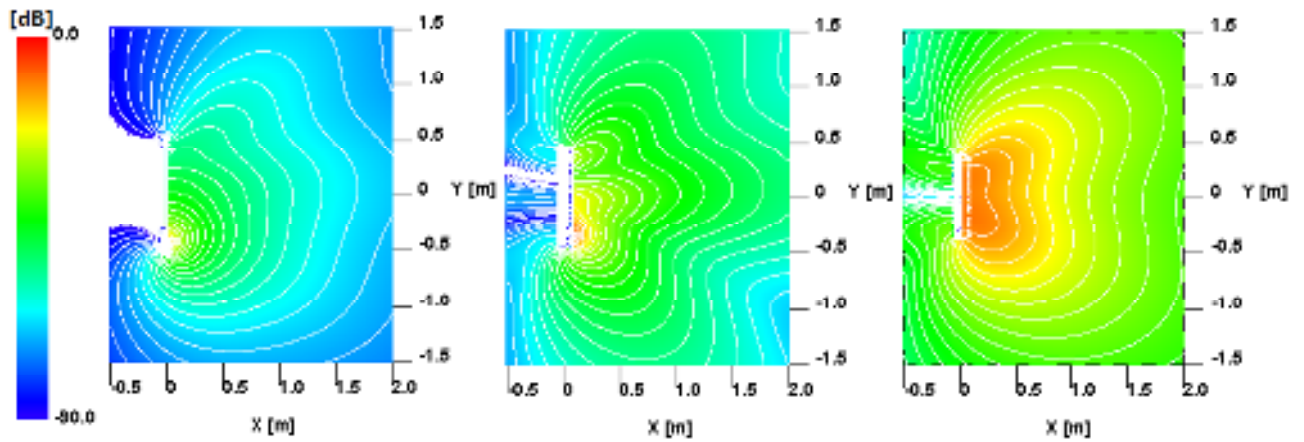


Fig. 9 Simulation results for 1 kHz sine wave and at center-height horizontal plane: standard 2-speaker system (left), left-and-right acoustic-barrier-based system (center), and proposed top-and-bottom acoustic-barrier-based system (right).

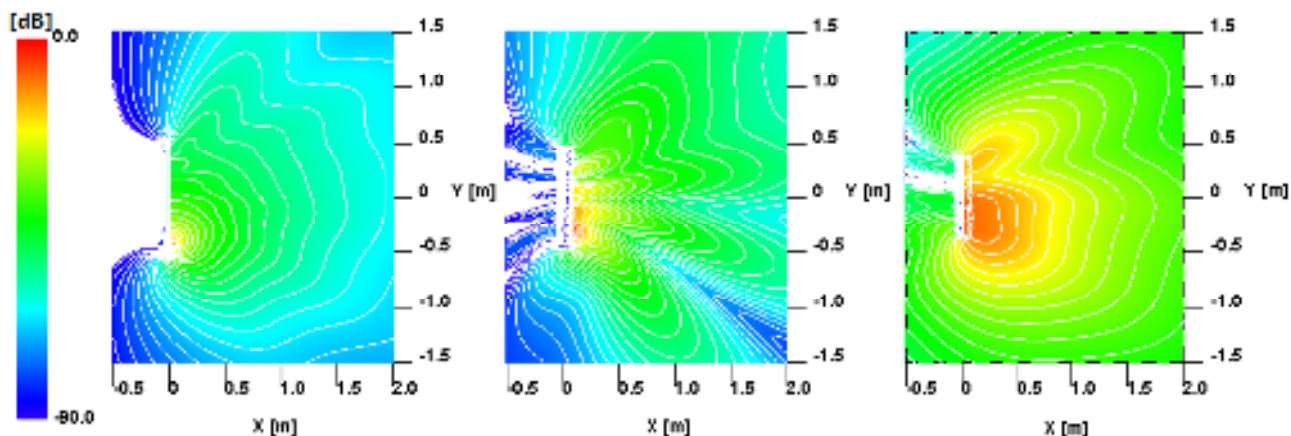


Fig. 10 Simulation results for 1 kHz sine wave and at center-height horizontal plane: standard 2-speaker system (left), left-and-right acoustic-barrier-based system (center), and proposed top-and-bottom acoustic-barrier-based system (right).

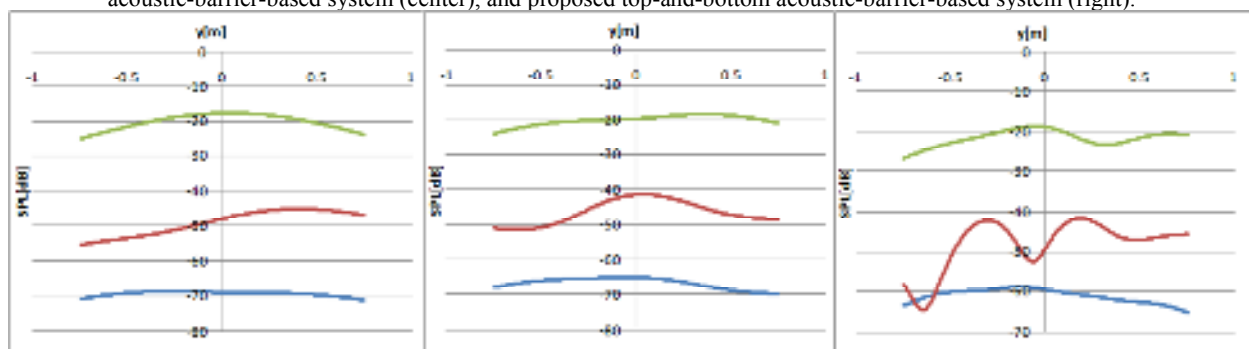


Fig. 11 Simulated SPL values at position of 1 m distant from display: for 250 Hz, for 500 Hz, and for 1 kHz.

4. おわりに

本研究では、従来型音響反射板方式における遮蔽問題の回避を目指した反射板形状を提案した。提案形状に対し、境界要素法を用いたシミュレーションを施すことで音響的特性を調査し、標準的ステレオ方式および従来型音響反射板方式と比較した。その結果、提案形状はディスプレイ付近の音圧を高め、音像のずれの抑制が期待できるという点で従来型音響反射板方式の音響的特性を残し、受聴位置に関わらない音像定位精度が期待できることが明らかになった。

本稿では、提案形状の音響的特性をシミュレーションにより解明したが、ディスプレイ面上の任意の点に音像を生成するには従来型音響反射板方式における各スピーカの音圧を制御するためのアルゴリズムを改変しなければならない。そのために、各スピーカの音圧を変えてシミュレーションを行い検討する必要がある。また、実際にシステムを構築した上で実測による音響計測を行い、シミュレーション結果と比較することで、提案形状の音響的特性を確認することも求められる。その上で受聴実験を行い、提案形状の効果を検証していきたい。

謝辞

本研究の遂行にあたり、日本電信電話株式会社 NTT コミュニケーション科学基礎研究所の Gabriel Pablo Nava 氏には多くのご助力、ご指導を頂きました。著者一同、厚く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] <http://www.mirainodenwa.com>
- [2] Gabriel Pablo Nava, Keiji Hirata, Masato Miyoshi, “A loudspeaker design for sound image localization on large flatscreens,” *Acous. Sci. & Tech.* 31(4), 278-287, 2010.
- [3] 小田尚行, Gabriel Pablo Nava, 萩巣晋平, 柴田真尚, 片桐滋, 大崎美穂, “平面ディスプレイと音響反射板を用いた音像生成システムの受聴実験評価”, 日本音響学会秋季研究発表会, 2011.
- [4] 澤崎博章, 山下春香, 中谷彰浩, 片桐滋, 大崎美穂, “映像の有無を伴う音響反射板方式の音像定位精度の評価”, *電子情報通信学会信学技報*, 9-16, 2013.
- [5] 澤崎博章, “音響反射板型音像生成方式における音源映像が及ぼす音像定位への影響に関する研究”, 同志社大学大学院理工学研究科修士論文, 2014.