

三次元放射音場再生のための 放射型スピーカレイの放射指向特性解析*

☆荒木峻我, 木村敏幸 (東北学院大)

1 はじめに

これまでに、遠隔で人々が取り囲みながら何も身に着けずに音楽ライブや舞台等のステージを鑑賞できる未来の 3D テレビの開発を目指し、三次元放射音場再生技術が提案されている[1].

三次元放射音場再生技術は、原音場において制御領域の境界面上に配置したマイクロホンアレイで音を収録し、再生音場において聴取領域の境界面上に配置した指向性スピーカアレイで収録した音をそのまま再生することによって、Huygens の原理[2]に基づき制御領域の波面を聴取領域で忠実に合成する音場再生技術である.

これまでに 64 個のスピーカユニットで構成される放射型スピーカアレイを製作し、点音源を提示するシステムを構築してきた[3]. しかし、スピーカユニットの放射指向特性については十分に解析されていない. そこで本研究では、代表的な 5 つのスピーカユニットを選出し、インパルス応答測定に基づいて各周波数帯域における放射指向特性を解析する.

2 放射型スピーカアレイ[3]

Fig. 1 に製作した放射型スピーカアレイの外観を示す. このスピーカアレイの外形寸法は $50\text{ cm} \times 50\text{ cm} \times 37.5\text{ cm}$ であり、側面 4 面に各 12 個 (4 列 $\times$ 3 行)、上面に 16 個 (4 列 $\times$ 4 行) のスピーカユニットが配置されている. また、Fig. 2 に示すように、筐体内部は吸音材を用いない空洞構造であるが、底板をパッチン錠を介して取り付けることで、スピーカアレイの内側に放射された音が外側に漏れないようにしている.

各スピーカユニットには VISATON 社製 BF32S (口径 3.2 cm) のフルレンジユニットを採用した. また、筐体には厚さ 12 mm の MDF 合板を使用した. さらに、64 個のスピーカユニットからの導線には、4 つの 25 ピン



Fig. 1 放射型スピーカアレイの外観[3]

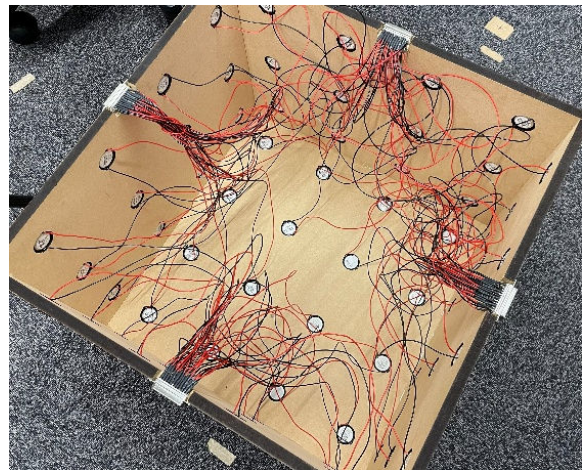


Fig. 2 放射型スピーカアレイの内部[3]

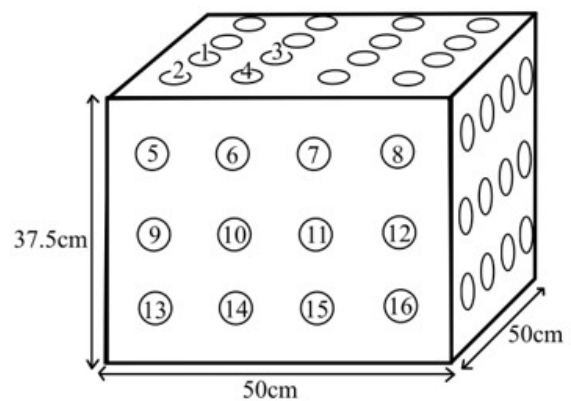


Fig. 3 スピーカユニットの配置図

D-sub コネクタを採用した. その際、D-Sub コネクタからの動線を考慮し、Fig. 3 に示すようにスピーカユニットの出力先は天板に 1-4 ch, 側板に 5-16 ch とした.

* Analysis of radiation directivity of radiated loudspeaker array for 3D radiated sound field reproduction, by ARAKI, Ryoga and KIMURA, Toshiyuki (Tohoku Gakuin University).

3 放射指向特性解析

3.1 解析対象

先行研究では、各面の中央に配置されたスピーカユニットを解析対象としていた[1]。しかし、本研究で製作した放射型スピーカアレイでは、各面の中央にスピーカユニットは配置されていない。また、本スピーカアレイは64個のスピーカユニットで構成されており、すべてのスピーカユニットについて複数の観測点における放射指向特性を測定・解析することは、測定および解析に膨大な作業時間を要するため困難である。

そこで、Fig. 4に示すように、各面間で線対称な位置関係となる中央近傍のスピーカユニットを、各面の代表ユニットとして選定した。以上より、計5つのスピーカユニットを解析対象とした。

3.2 インパルス応答測定

インパルス応答の測定は研究室の実験室内で実施した。測定時の室温は23.5℃、暗騒音レベルは42.8 dB(A)、残響時間は0.79 sであった。解析対象である5つのスピーカユニットに対して18本の無指向性マイクロホンを配置した。マイクロホンの配置をFig. 5に示す。各マイクロホンは、解析対象スピーカユ

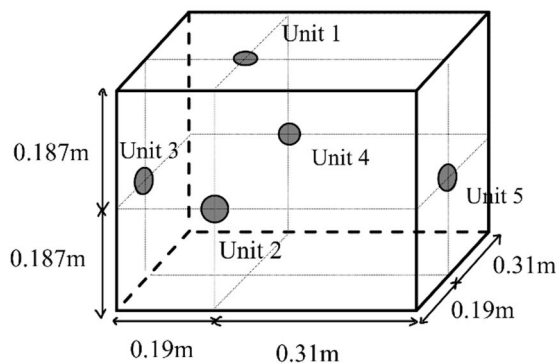


Fig. 4 対応するスピーカユニット

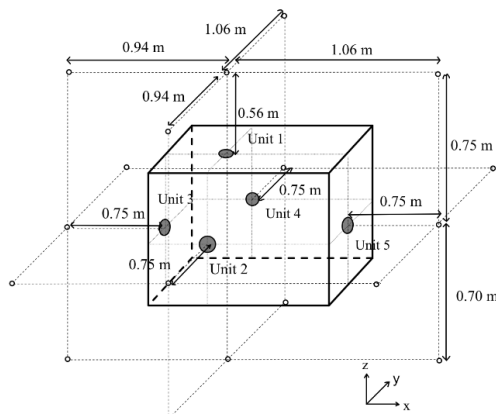


Fig. 5 マイクロホンの配置図

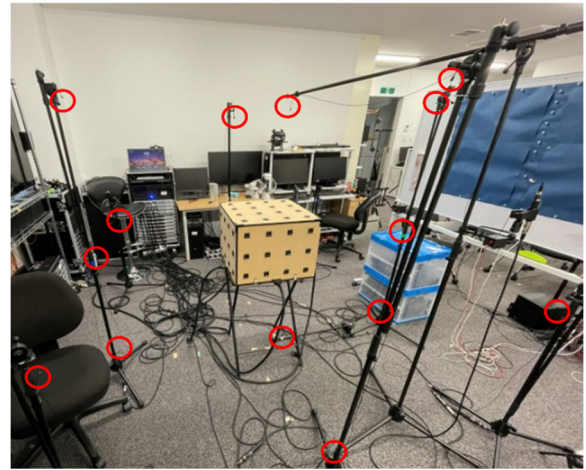


Fig. 6 実際の収録環境

Table 1 インパルス応答測定条件

項目	条件
サンプリング周波数	48 kHz
TSP 長	65536 samples
同期加算回数	9
測定マイク数 (N)	18
評価ユニット	5

ニットを中心として、様々な水平面および鉛直面となる位置に配置し、三次元的な放射指向特性を測定した。なお、Unit 1は他の解析対象スピーカユニットとは異なり、z方向を向いて配置されている。そのため、Unit 1については、xz平面上の角度を水平面、yz平面上の角度を鉛直面として定義した。スピーカ正面0.2m地点での白色雑音再生時の音圧レベルを88.0 dB(A)に設定した。実際の収録環境をFig. 6に示す。

インパルス応答の測定条件をTable 1に示す。測定にはTime Stretched Pulse (TSP) 信号[4]を用い、TSP信号の再生および収録にはCubase[5]を使用した。TSP信号のサンプリング周波数48 kHz、量子化ビット数は16 bitである。各解析対象スピーカユニットについてTSP信号を10回繰り返し再生・収録し、収録信号を平均化した後、逆TSP信号との畳み込み演算により各マイクロホン位置におけるインパルス応答を算出した。測定は5つの解析対象スピーカユニットそれぞれについて実施し、各測定では解析対象ユニットのみを駆動した。また、各マイクロホン固有の感度および周波数応答のばらつきを低減するため、あらかじめ取得した基準データを用いてマイクロホン特性の補正を行った。

3.3 放射指向特性算出

得られたインパルス応答を用いて、各周波数帯域における放射指向特性を解析した。まず、各マイクロホンで取得したインパルス応答から直接音のみを含む区間を切り出し、後続する反射音および残響成分を除去した。

次に、得られたインパルス応答に音源信号を畳み込むことにより、音声信号を合成した。音源信号には中心周波数 250 Hz, 500 Hz および 1000 Hz の 3 つのオクターブバンドノイズを用いた。各スピーカユニットの放射指向特性 $D_i(\theta, \phi)$ は合成音声信号の実効値を用いて、以下の式(1)により算出した。

$$D_i(\theta, \phi) = 20 \log_{10} \frac{d_{i,0,0}}{d_{i,\theta,\phi}} \sqrt{\frac{\int_0^T \{s_{i,\theta,\phi}(t)\}^2 dt}{\int_0^T \{s_{i,0,0}(t)\}^2 dt}} \quad (1)$$

ここで、 T ($=1$ 秒) は時間長を表す。 $s_{i,\theta,\phi}(t)$ は合成音声信号、 $d_{i,\theta,\phi}$ は i 番目のスピーカユニットにおいて放射方向の方位角及び仰角がそれぞれ θ, ϕ のときの、スピーカユニットとマイクロホンの距離を示す。

本式では、各マイクロホン位置における距離減衰を補正するとともに、正面方向 ($\theta=0^\circ$, $\phi=0^\circ$) の音圧レベルを基準として正規化することで、各周波数帯域における放射指向特性を算出した。

3.4 解析結果

解析対象とした 5 つのスピーカユニットについて、250 Hz, 500 Hz および 1000 Hz における放射指向特性を比較した。Figs. 7～8 に水平面および鉛直面の放射指向特性を示し、各周波数帯域における指向性の特徴について考察する。

水平面方向の放射指向特性では、すべてのスピーカユニットにおいて正面方向 (0°) で最大音圧を示し、正面から角度が大きくなるにつれて音圧が低下した。特に $150^\circ \sim 180^\circ$ 付近の背面方向では 10 dB 以上の減衰が認められ、製作した放射型スピーカアレイが前方への指向性を有していることが示された。また、250 Hz と比較して 500 Hz および 1000 Hz では側方および背面方向の減衰量が増加しており、周波数の上昇に伴って指向性が鋭くなる傾向が認められた。これは、波長の短縮に伴い筐体を通じた回折が少なくなり、スピーカユニットの指向性が強く現れたためであると

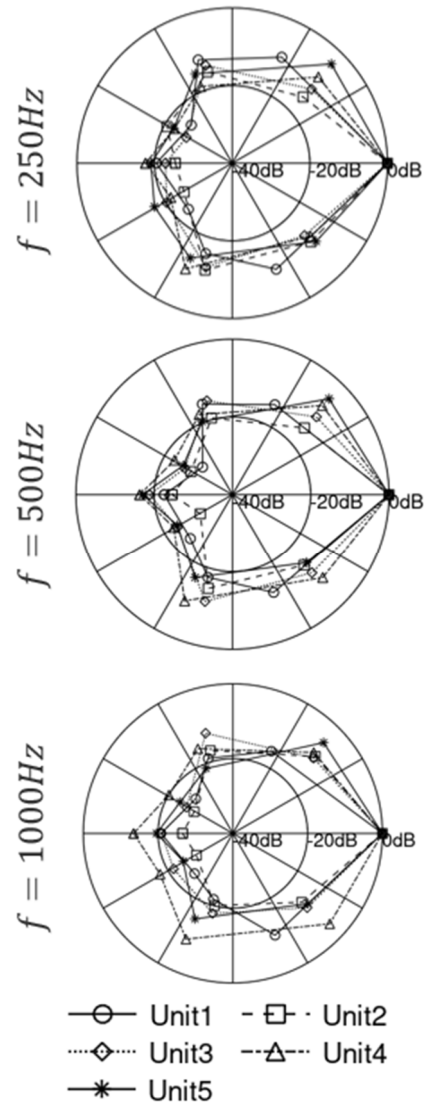


Fig. 7 放射指向特性（水平面）

考えられる。

鉛直面方向についても、水平面方向と同様に正面方向で最大音圧を示し、正面から離れるにつれて音圧が減衰した。背面方向では 10 dB 以上の減衰が確認され、上下方向に対しても前方へ音を放射する指向特性が得られていることが確認できた。一方で、 $210^\circ \sim 270^\circ$ 付近ではスピーカユニット間のばらつきが比較的大きく、特に 1000 Hz においてその傾向が顕著であった。

各スピーカユニットの放射パターンを比較すると、いずれの周波数においても概ね類似した形状を示しており、製作した 5 つのスピーカユニットはおおむね同一の放射特性を有していることが確認された。しかし、一部の角度では数 dB 程度の差異が見られたことから、スピーカユニットの製作誤差や測定誤差、筐体構造などの影響が放射特性に現れている可能性が考えられる。

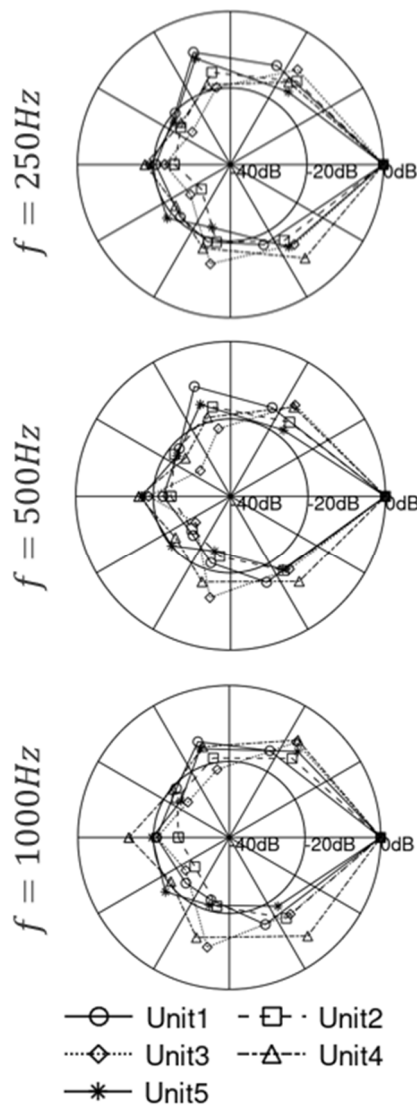


Fig. 8 放射指向特性（鉛直面）

以上の結果より，製作した放射型スピーカアレイは全体として前方に音を集中して放射する指向特性を有しており，周波数が高くなるほどその指向性が強くなることが確認された．また，各スピーカユニット間の放射特性は概ね一致していることから，アレイを構成するユニットとして両行な一貫性を有していることが示された．

4 おわりに

本研究では，製作した放射型スピーカアレイの放射指向特性をインパルス応答測定に基づいて解析した．その結果，本研究で採用した筐体の材質および構成において，正面方向に対して背面方向で音圧レベルが低下する傾向を確認した．また，各ユニットの放射指向特性を把握することができ，放射型スピーカアレイの音響特性に関する基礎的な知見を得た．

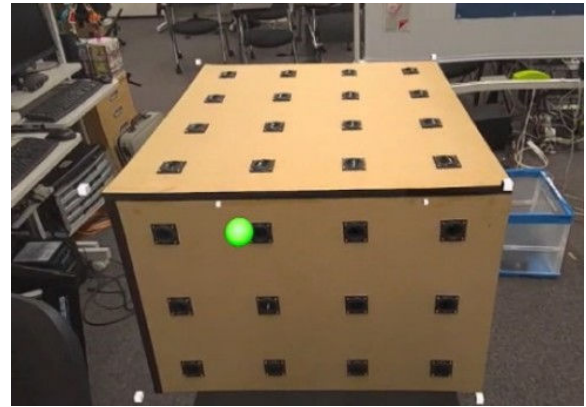


Fig. 9 実験システム

今後は，Fig. 9 に示す実験システムを用い，MR を用いた放射型映像提示システム[6]と本研究で用いた放射型スピーカアレイを組み合わせ，音像定位精度の評価や腹話術効果の影響の検証等を行う予定である．また，得られた放射指向特性を音場再生システムの設計・改善に活用し，放射型スピーカアレイのさらなる性能評価を進める．

参考文献

- [1] T. Kimura, Y. Yamakata, M. Katsumoto, T. Okamoto, S. Yairi, Y. Iwaya and Y. Suzuki, "Three-dimensional Radiated Sound Field Display System Using Directional Loudspeakers and Wave Field Synthesis," Acoust. Sci. & Tech., Vol. 33, No. 1, pp. 11-20 (2012).
- [2] B. B. Baker and E. T. Copson, The Mathematical Theory of Huygens' Principle (Oxford University Press, London, 1950), pp. 23-26.
- [3] 荒木峻我, 木村敏幸, "三次元放射音場再生のための放射型スピーカアレイの製作," 令和 8 年東北地区若手研究者研究発表会講演資料, No. YS-24-D08, pp. 89-90 (2026).
- [4] 河原英紀, "インパルス応答の基本概念", 音響誌, 76 巻, 3 号, pp.148-155 (2020).
- [5] Cubase, <https://www.steinberg.net/ja/cubase/>.
- [6] 荒木峻我, 木村敏幸, "三次元放射音場再生のための MR ゴーグルを用いた放射型映像提示システムの評価," 日本音響学会春季研究発表会講演論文集, No. 2-9-17, pp. 387-390, March 2026.