# MR・AR デバイスを用いた音場可視化システム OTOMIRU<sup>™</sup> Ver.2 の開発

Development of "Sound Field Visualization System OTOMIRU<sup>TM</sup> Ver.2" using MR / AR Devices

| 佐藤 考浩*1                  | 岩根康之**2                                | 小林 真人*1            | 及 川 靖 広≋₃       |
|--------------------------|--|--------------------|-----------------|
| Takahiro Sato            | Yasuyuki Iwane                         | Masahito Kobayashi | Yasuhiro Oikawa |
| 井上 敦登**³<br>Atsuto Inoue | 寺 岡 航 <sup>**3</sup><br>Wataru Teraoka |                    |                 |

# 【要旨】

音の可視化手法の一つであるビームフォーミング法を用いた従来の手法では, 算出された音圧レベル分布がカメ ラ映像に平面的に重畳されることにより, 映像の奥行方向での音源位置を探査することが難しい点や, 音圧レベル 分布の算出範囲がカメラの画角内に限られるという点が課題として挙げられる. そこで、本研究では 3DCG を実 際の空間上に存在するかのように提示することができる MR・AR デバイスを用い,3 次元的な音圧レベル分布を 計測・可視化する"音場可視化システム OTOMIRU<sup>™</sup> Ver.2"を開発した. 位置や範囲を任意で設定することができ る複数断面の音圧レベル分布や、点群データの座標を解析点とした物体表面上の音圧レベル分布を可視化するこ とで、建設工事により発生する音の発生状況の検討や、建具の遮音欠損部の探査のような建築音響性能の検証に適 用できることを示した.また、時間軸上で音圧レベル分布の移動平均値を可視化することによる効果を示した.

【キーワード】 音の可視化 ビームフォーミング法 複合現実 (MR) 拡張現実 (AR)

# 1. はじめに

建設工事現場や建物、設備機器などから発生する騒音 による周辺環境への影響を低減するためには、騒音の発 生源や伝搬状況を把握し, 適切な対策を施すことが重要 となる. このような音の発生源に係る情報を取得するた めには、マイクロホンを複数の位置に設置して音を計測 することが一般的であるが、計測範囲が広域になる場合 は時間や労力を要する作業となり、高所など人が立ち入 って計測機器を設置できない場所では必要な音場情報が 取得できないといった課題もある.このような背景から, 音の発生状況をより効率的に特定することを目的として, 様々な音の可視化技術が提案されており、その中の一つ としてアレイ信号処理であるビームフォーミング法が広 く用いられている. ビームフォーミング法では様々なア ルゴリズムが提案されているが、基本的にはある方向か らの音が複数設置されたマイクロホン(マイクロホンア レイ)に到達するときの時間差を用いて入射波の位相が 見掛け上等しくなるように補正を行い、特定の方向にお ける音圧レベルを求める手法であるり.この手法により 対象範囲の音圧レベル分布をリアルタイムで算出するこ とができ, 音の到来方向や音源位置の探査に適用されて

いる.しかし、現在提案されているビームフォーミング 法を用いた音の可視化技術(以下,従来技術)では,算出 された音圧レベル分布はマイクロホンアレイに内蔵され た固定カメラで撮影した映像にカラーマップとして平面 的に重ね合わせられ、PC などのディスプレイ上で表示さ れることが多い2). そのため, 音場の計測範囲が固定カ メラに対して奥行方向に広がっている場合、平面的な可 視化結果では画面の奥行方向での音源位置を探査するこ とが難しくなる.また、音圧レベル分布の算出範囲はカ メラの画角内に限られることから、画角外の音場を把握 するためにはマイクロホンアレイや固定カメラの角度を 変えたり、設置位置を移動させる必要がある.

以上のような従来技術の課題を解決し、より精度良く 効率的にビームフォーミング法を行うため、本研究では 複合現実(MR: Mixed Reality)および拡張現実(AR: Augmented Reality) をビームフォーミング法に適用し、"音 場可視化システム OTOMIRU<sup>™</sup> としてシステム化した<sup>3</sup>. さらに、従来技術よりも音圧レベル分布の計測範囲を拡 張し,3次元的な音圧レベル分布を計測・可視化する手法 を"音場可視化システム OTOMIRU Ver.2"(以下,本シス テム)として実装した.本システムによる音圧レベル分

1. 技術研究所 研究開発 G 第二研究室 2. 土木本部 [大阪] 北陸道覆工再生曽々木作業所

<sup>3.</sup> 早稲田大学/株式会社 INSPIREI

布の可視化例を図-1に示す.同図は、計測対象である 建設重機の位置に合わせて音圧レベル分布の計測範囲を 設定し、MR・ARデバイスを通して音圧レベル分布がカ ラーマップとして可視化されている状況であり、音圧レ ベルが大きくなるにつれて、青から緑、赤にグラデーシ ョンで色が変化するカラーマップとなっている.このよ うに、MR・ARデバイスにより3DCG化された音圧レベ ル分布を実空間上に存在するかのように表示させること で、奥行方向での音源定位精度の向上および広範囲の音 場情報の可視化を実現する.

本稿では、本システムの概要と適用事例、計測精度を 向上させることを目的に実装した可視化表現の概要と精 度の検証結果を報告する.

### 2. OTOMIRU Ver.2 の概要

#### 2.1 システム構成

本システムの構成を図-2に示す. 音声信号の収録に は16chのマイクロホンが取り付けられたマイクロホンア レイを用いる. PCアプリケーションでは, LiDAR (Light Detection and Ranging) センサを用いて事前に取得した計 測対象空間の点群データを取り込み、3Dモデル上でマイ クロホンアレイの設置位置を基準とした音圧レベル分布 の算出範囲を設定する. その他にも音圧レベル分布を算 出する周波数帯域をパラメータとして設定し、AD変換を して取り込んだ音声信号に対してビームフォーミング処 理を行う. なお、ビームフォーミング法のアルゴリズム については、MVDR (Minimum Variance Distortionless Response) ビームフォーマを適用して、3次元の音圧レベ ル分布を算出しており4,算出する音圧レベルの点数に もよるが、5~25 FPS (Frames Per Second) 程度の速度で リアルタイムの音圧レベル分布が出力される. ビームフ オーミング法で算出された音圧レベル分布のデータは, PCアプリケーションの3Dモデル上でカラーマップとし て表示されるとともに, TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol) 通信により連動するMR・ARデ バイスにバイナリデータで転送される. このバイナリデ ータをもとにMR・ARデバイス内でカラーマップを作成 し、図-1に示したように音圧レベル分布が実空間上に 表示される. MRデバイスとしてヘッドマウントディスプ レイ型であるMicrosoft社製のHoloLens 2, ARデバイスと してタブレット端末型であるApple社製のiPad Proを導入 しており、複数台のMR・ARデバイスを同時に接続し音 圧レベル分布を可視化させることができる. なお, HoloLens 2は装着者の目の位置に搭載されている透明な ディスプレイに3DCGのみが映し出される光学透過型の デバイスであり、透明なディスプレイを通して目に入る 風景の中に3DCGが重畳される.一方、ARデバイスのiPad Proでは、カメラで撮影した映像上に3DCGが重畳された



叉-音圧レベル分布の可視化例 - 1 マイクロホンアレイ PCアプリケーション 点群データによる3Dモデル AD 変換 16chのマイクロホンで 音声情報を収録 LiDARセンサで事前取得 ・ムフォ ミング法の パラメータ設定、実行 ・3Dモデル上での 音圧レベル分布の可視化 ▼TCP/IP ビームフォーミング法の 通信 パラメータ設定情報を送受信 音圧レベル分布の算出結果を バイナリデ タで転送 MR・ARデバイス(HoloLens 2、iPad Pro) 実空間上で可視化 図-2 システム構成 MR・ARデバイス PCアプリケーション アプリケーション 音圧レベル分布を バイナリデータとパラメータ設置情報から カラーマップ作成 バイナリデータに変換 パラメータ設定情報 MR・ARデバイスとマイクロホンアレイの 位置関係を定義 マイクロホンアレイ 深度センサ・ 加速度センサ 3次元形状認識· カメラ 自己位置推定 AR (SLAM) マーカ認識 マーカ ディスプレイ 3DCGのカラーマップを表示 音情報 -▶ 画像認識 → 設定値 形状情報 図-3 MR・ARデバイスでの処理フロー

様子がデバイスのディスプレイで表示される.

#### 2.2 MR・ARデバイスでの可視化処理と特長

MR・ARデバイスでの音圧レベル分布の可視化に係る 処理フローを図-3に示す.MR・ARデバイスには、音 圧レベル分布を可視化するためのアプリケーションがイ ンストールされており、このアプリケーションとPCアプ リケーションの間でビームフォーミング法でのパラメー タの設定やバイナリデータに変換された音圧レベル分布 の結果が送受信される.

本システムで導入したMR・ARデバイスでは、深度センサや加速度センサを用いて計測対象空間の3次元形状と自己位置の推定を同時に行う技術であるSLAM (Simultaneous Localization and Mapping)が常に行われて いる.また、実空間での原点としてマイクロホンアレイ に取り付けられているARマーカをカメラで認識し、AR マーカの位置情報とSLAMで取得した情報を紐づけるこ とで、MR・ARデバイスとマイクロホンアレイの位置関 係がMR・ARデバイスのアプリケーションで定義される. この位置関係の情報とPCアプリケーションで設定した 音圧レベル分布の算出範囲の情報により、3DCG化された 音圧レベル分布のカラーマップがMR・ARデバイスのデ ィスプレイを通して実空間上の適切な位置に表示される.

さらにSLAMが行われることによって、MR・ARデバイ スの計測位置を移動しても表示されるカラーマップの位 置は空間上で固定され続けるため、マイクロホンの設置 位置によらずどの位置からでもカラーマップを観測する ことができる.このような特長から、音圧レベル分布の 計測範囲が広域にわたる場合でも、MR・ARデバイスの 計測位置を変えながら空間全体の音場情報を可視化する ことが可能となる.

#### 2.33次元音圧レベル分布の可視化方法

本システムでは、3次元の音圧レベル分布を可視化する 方法として、2種類の手法を実装している.

1つ目の手法では、位置、角度、範囲を任意に設定でき る複数の断面を設定し、その断面内の音圧レベル分布を 算出する方法を実装した.図ー4に示すように、断面の 位置、角度、範囲はPCアプリケーションで数値を入力す るか3Dモデル内に表示されているカラーマップを操作 することで決定され、各断面での音圧レベルの算出点数 も任意に定義することができる。複数断面での音圧レベ ル分布の可視化例として複数のスピーカを用いた実験の 結果を図-5に示すが、従来手法に比べて空間全体に点 在する音源の位置を一度に把握しやすくなっており、音 場計測の効率化に寄与することができる。また検証対象 に合わせて断面の配置を柔軟に設定できることから、よ り詳細な騒音の発生状況の検証に適用することができる。

2つ目の手法では、PCアプリケーションに取り込む計 測対象空間の点群データの座標を音圧レベルの算出点と して、音圧レベル分布を算出する方法を実装した.本手 法で算出した音圧レベル分布をPCアプリケーションの 3Dモデル上で可視化した結果を図-6に示す.物体形状 に沿った音圧レベル分布を可視化することで、建築物に おける界壁や建具の遮音欠損部の探査、壁面での反射音 の発生箇所の検討、形状が複雑な設備機器からの異音発 生箇所の探査といった用途に適用することができる.

#### 3. OTOMIRU Ver.2 の適用事例

#### 3.1 複数断面の音圧レベル分布の可視化

複数断面の音圧レベル分布を可視化する手法の事例と して、建設工事現場での重機を用いた作業から発生する



図-4 音圧レベル分布を算出する断面の設定



図-5 複数断面の音圧レベル分布の可視化例



図-6 物体表面の音圧レベル分布の可視化例

音を可視化した結果を報告する.本事例では、トンネル 工事における掘削土砂を搬出する作業を行うバックホウ およびダンプトラックを対象とし、重機の位置に合わせ て設定した2つの断面での音圧レベル分布を算出した. ARデバイスで可視化した結果を図-7に示す.ダンプト ラックの荷台に土砂が積み込まれる際の音やバックホウ のエンジン音が主要な音源であることがわかる.本事例 では各断面で音圧レベルが最も大きい部分を基準として カラーマップのグラデーションが生成される設定であっ たが、カラーマップで表現する音圧レベルの上端値・下 端値を固定する設定とすることで、基準値を超える騒音 源を探査することも可能である.

#### 3.2 物体表面の音圧レベル分布の可視化

点群データを用いて物体表面の音圧レベル分布を可視



図-7 建設工事現場での計測結果

化する手法の事例として, 建具の遮音性能評価や遮音欠 損部の探査を行った結果を報告する.本事例では、計測 対象とするドア内側の居室に設置したスピーカからホワ イトノイズを発生させ、音の漏洩状況をドアの外側から 可視化した. なお、音圧レベル分布はiPad ProのLiDARセ ンサで事前に取得した対象空間の点群データの座標を解 析点として算出した. 音圧レベル分布をPCアプリケーシ ョンの画面およびARデバイスで可視化した結果を図-8に示す.同図のPCアプリケーションの画面では空間全 体の音場を俯瞰的に可視化しており、ARデバイスでは計 測対象のドアに近づいて音場を可視化しているが, カラ ーマップからドアの隙間部分の音圧レベルが大きいこと がわかり,居室内部から外部への音の漏洩状況を確認す ることができる. このように点群座標を用いて物体の形 状に沿った音圧レベル分布を可視化することにより、遮 音欠損部の詳細な検討に適用できる.

# 4. 可視化表現の改良による計測精度の向上 4.1 改良の目的と実装内容

2.1節で示したように、本システムでは5~25 FPS程度の 速度で音圧レベル分布が算出され、算出速度が10FPS程度 を超えるとリアルタイム性のある結果を可視化すること ができる.その一方、計測対象が継続時間の短い衝撃騒 音の場合は、算出速度が速いと目視で音の発生状況を捉 えることが困難となる.また、建物内部のような閉空間



図-8 建具の遮音性能に関する計測結果



においては音源からの直達音だけでなく反射音も発生し、 直達音の位置を探査する場合は反射音も可視化されるこ とで音源定位精度が低下するといった課題もある.そこ でこれらの課題を解決するため、ビームフォーミング法 で算出される音圧レベル分布を各時点から任意のフレー ム分遡って移動平均した結果を表示する可視化表現を追 加実装した.

## 4.2 改良した可視化表現の精度検証の概要

改良した可視化表現の精度を検証するため、 図-9に



図-10 音圧レベル分布の計測範囲



(a) 移動平均なしの結果



(b) 8フレーム分の音圧レベル分布を移動平均した結果図-11 重量床衝撃音の可視化結果

示す居室を受音室とした重量床衝撃音遮断性能と室間遮 音性能に関する実験を行い,受音室内の音場を本システ ムで可視化した.

重量床衝撃音遮断性能に関する実験では、受音室と寸 法や仕様が同様で受音室の直上となる居室において、床 面中央に衝撃源のゴムボールを自由落下させ重量床衝撃 音を発生させた.室間遮音性能に関する実験では、受音 室と寸法や仕様が同様である受音室の隣戸を音源室とし、 音源室に図-9のように設置したスピーカを用いて1/1 オクターブバンドの1k Hz帯域から4k Hz帯域のバンドノ イズを発生させた.なお、音圧レベル分布は図-10に 示すように天井面1面と壁面2面に設定して計測した.

#### 4.3 精度検証の結果

受音室内に設置したiPad Proを用いて重量床衝撃音が 発生した直後から0.45秒後までの音圧レベル分布を可視 化した結果を図-11に示す.なお、本計測では音圧レ ベルが67 dB以上となる範囲をカラーマップとして表示 する設定としている.図-11(a)の音圧レベル分布を 移動平均せずに表示させた結果をみると、床衝撃音の発 生直後の図では天井面や壁面でいくつか音圧レベルが大 きい範囲が定位されているが、その0.15秒後には天井や 壁の広い範囲が赤く表示されるなど、音圧レベル分布の 結果にばらつきがみられることがわかる.一方,図-1 1(b)では各時点から8フレーム前までの音圧レベル分 布を平均した結果が可視化されているが,床衝撃音が発 生した直後は音圧レベル分布から音源を定位できないも のの,発生から0.15秒後以降では音圧レベル分布のばら つきが少なく,天井面や壁面で音圧レベルが大きくなっ ている箇所を目視で特定することができる.以上の結果 より,時間軸方向で移動平均した音圧レベル分布を可視 化することにより,突発的に発生する音に対しても主要 な音源を定位することが可能となる.

続いて、室間遮音性能計測時の隣戸からの側路伝搬音 を受音室内のiPad Proで可視化した結果を図-12に示 す.本計測では、音圧レベルが59dB以上となる範囲をカ ラーマップで表示している.音圧レベル分布を移動平均 せずに表示させた図-12(a)の結果をみると、音圧レ ベルが大きい範囲にばらつきがみられ、隣戸で発生した 音の伝搬経路を特定することはできない.一方、前述の 図-11と同様に8フレーム分の音圧レベル分布を移動 平均して表示させた図-12(b)の結果をみると、音圧 レベルが大きい範囲はドアのアンダーカット部で安定し た結果となっている.この結果より、隣戸からの音は共 用廊下を介してドアのアンダーカット部から流入してい ると推察される.このように定常的な音を対象とした場



(b) 8フレーム分の音圧レベル分布を移動平均した結果

図-12 側路伝搬音の可視化結果

合でも、建物内部のような直達音だけでなく反射音の寄 与も大きい空間では、移動平均した音圧レベル分布を可 視化することにより、主要な騒音源を定位しやすくなる ことを確認した.

# 4. まとめ

本稿では、ビームフォーミング法を用いて算出した 3 次元的な音圧レベル分布を MR・AR デバイスにより実空 間上で可視化する"音場可視化システム OTOMIRU<sup>TM</sup> Ver.2"のシステム概要および適用事例を報告した. さら に、計測精度を向上させることを目的に実装した可視化 表現の概要と精度の検証結果を示した. 今後は、さらに 音源定位精度を向上させることを目的にビームフォーミ ング法のアルゴリズムを改良するほか、システムを小型 化するための検討を重ね、適用先をさらに広げていくこ とを目指す.

謝辞:計測のためのフィールドを提供いただいた R4 平 方樋管作業所および新幹線札樽トンネル作業所の皆様に この場を借りて深く御礼申し上げます.

## 【参考文献】

- 浅野太:音のアレイ信号処理-音源の定位・追跡と分離-,日本音響学会編,コロナ社,2011.
- 2) 尾本章,中原雅考,高島和博:音の可視化技術,映像 情報メディア学会誌, Vol.65, No.4, pp.453-458, 2011.
- 3) 佐藤考浩, 岩根康之, 小林真人, 及川靖広, 井上敦登, 寺岡航:光学透過型ヘッドマウントディスプレイを用 いた音圧分布可視化システムの開発ーシステム構成お よび適用実験によるシステム有効性の検討ー,とびし ま技報, No.69. pp.49-52, 2021.
- 4)後藤昌彦,草野翼,潘明宇,井上敦登,寺岡航,及川 靖広,佐藤考浩,岩根康之,小林真人,"光学透過型へ ッドマウントディスプレイを用いた音圧分布可視化手 法に関する研究ーその 5 MVDR を用いた三次元音源 位置推定の検討ー,"日本音響学会 2022 年秋季研究発 表会講演論文集, pp.827-828, 2022.

**Summary** In conventional methods based on the beamforming method, which is one method of sound visualization, the distribution of calculated sound pressure level is generally superimposed two-dimensionally on a camera image. This can make it difficult to locate the sound source in the depth direction of the image, in addition to limiting the calculated range of the sound pressure level distribution to the angle of view of the camera. In response, we developed the Sound Field Visualization System OTOMIRU<sup>TM</sup> Ver.2, which measures and visualizes the three-dimensional sound pressure level distribution using MR/AR devices and presents the results as three-dimensional computer graphics as three dimensional objects in a real space. The system allows the viewing of sound pressure level distributions in multiple cross sections, where the position and range can be set arbitrarily, and visualizes the sound pressure level distribution on the surface of an object using the coordinates of point cloud data as the analysis points. This system can be used to investigate sounds generated during construction or to assess the acoustic performance of a building, including detecting sound insulation defects in fixtures. Additionally, we discuss the effects of visualizing the moving average of sound pressure level distribution on the time axis.

Key Words : Sound visualization, Beamforming method, Mixed Reality (MR), Augmented Reality (AR)