

騒音対策支援のための可聴化システム

谷川 将規 宇野 昌利 宮瀬 文裕
(技術研究所) (土木技術本部) (土木技術本部)

Auralization system for Countermeasure Support against Construction Noise

Masaki Tanigawa, Masatoshi Uno and Fumihiro Miyase

建築・土木工事現場における騒音対策支援を目的として、建設重機からの騒音や防音壁による対策効果などを事前に耳で聴いて確認できる騒音可聴化システムを開発した。本システムは小型で扱いやすい iPad 上で動作する。音響シミュレーションには、独自の高速計算法を採用しているため、計算条件設定後、直ちに可聴化できる。本稿では、本システムの概要と特長に続いて可聴化用音源信号の生成や防音壁などの回折に関する独自の高速計算法を示し、次に、本システムの有用性、実用性、ならびに現場での騒音対策における本システムの活用例を示す。

This paper presents an auralization system of the construction noise from the machineries, the construction works and so on. The system runs on a portable tablet computer (iPad) and provides several intuitive user interfaces to setup conditions for sound propagation simulation. The system immediately auralizes the simulation results by unique high speed algorithms for the signal generation and the sound diffraction. Three methods of auralization are also presented. Furthermore, a utilization of the system for a countermeasure support is presented.

1. はじめに

建築・土木工事現場では重機の作業音、ダンプトラックの走行音などについて様々な騒音対策を実施している。対策を検討する際には、発注者や近隣住民と協議する場面も多い。一般に施工者は工事騒音の大きさや対策による騒音低減効果を数値として示すが、それらの数値は実際に耳で聴く音と直感的に結びつかないため、十分な理解を得られにくい。大掛かりなシミュレーション装置を使えば、騒音予測結果を音としてリアルに再現することも可能だが、そのような装置を協議の場に持ち込むことは現実的ではない。

そこで、著者らの VR (バーチャル・リアリティ) 技術^{1),2)}を活用して、騒音対策支援のための騒音可聴化システムを開発した。これにより騒音シミュレーション結果を音として再現し、騒音対策効果を直ちに体感できる。図-1に示すように、本システムはタブレット・コンピュータ (iPad) 上で動作し、コンパクトで扱いやすい。計算条件の設定や可聴化の実行は画面をタップ、スワイプするなど直感的な操作で行うことができ、素早く騒音検討の基礎データを得ることができる。そのため、協議の場などでの合意形成に役立つことが

期待される。本稿では、この可聴化システムにおける騒音可聴化の手法と活用例について述べる。

2. 本システムの特長

図-2に本システムの構成と可聴化の流れを示す。騒音の可聴化は条件設定、音響計算、音響再生の3ステップで構成される。全ステップを1台のiPadで実現しており、スピーカやヘッドホンなどの再生機器を除けば他に必要な機器はない。

各ステップの特長は以下のとおりである。



図-1 騒音可聴化システムの概観

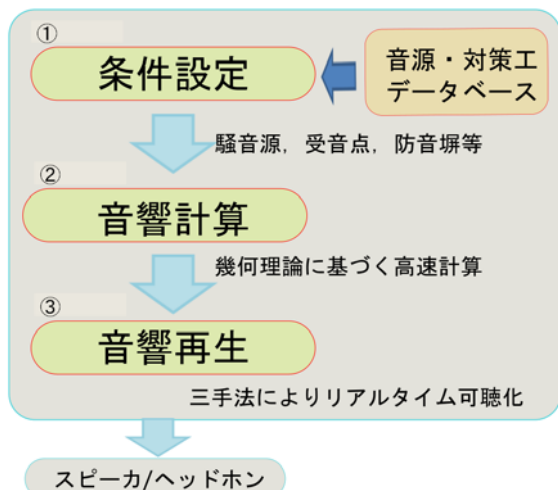


図-2 騒音可聴化システムの構成

- ① 条件設定: 内蔵されている騒音源や各種対策工のデータベースを用いて計算条件を設定する。騒音源データは実測結果を可聴化用に後述する手法で加工したものである。
- ② 音響計算: 一般に用いられる騒音予測法では音波の到来方向や遅延等は考慮されず、そのままでは可聴化できない。本研究では独自の高速計算法を採用し、到来方向や遅延を考慮しつつ、音響計算結果を遅延なくその場で可聴化できる。
- ③ 音響再生: 使用状況に応じて最適な可聴化手法を選択でき、臨場感のある音場が再現可能である。

以下では、上記の各ステップの詳細を述べる。

2.1 可聴化用信号の生成

前述したように種々の建築・土木現場に対応できるように、騒音源および防音壁、騒音能動制御 (ANC) 等の各種対策工の遮音性能データベースを内蔵する (図-2)。さらに対象騒音以外の音 (暗騒音あるいは環境騒音) も考慮でき、より現実的な音環境の再現ができるように工夫されている。これらの音響データは後から追加できる。騒音源のデータは、実際の重機の作業音や自動車走行音の実測結果を以下に述べる方法により可聴化用信号に加工を施した¹⁾。

可聴化用音源信号の生成に関して大型車の走行音を例に述べる。まず図-3 に示すように、実際に自動車を一定速度で走行させ、測定点前を通過して十分な距離が離れるまで間の走行音を収録した。図-4(a) は収録した自動車走行音の波形の例 (速度 90km/h、収録時間: 約 15 秒、C 特性補正、サンプ

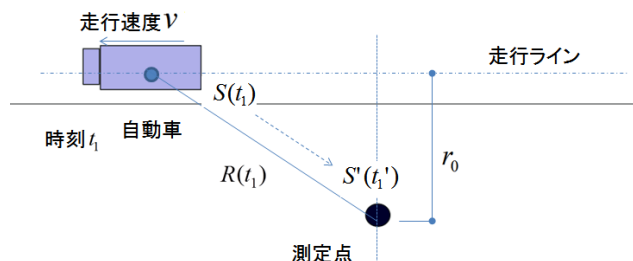


図-3 自動車走行音測定の概要

リング周波数: 20kHz) である。横軸は時間、縦軸は最大音圧で基準化した相対音圧である。図-4(a) から可聴化用の音源データを生成するには、距離減衰などの影響を取り除く必要がある。議論を簡単にするため 2 次元問題とする。図-3 に示すように、走行ラインと測定点の距離を r_0 とする。自動車は一定速度 v で走行ライン上を走行し、自動車が測定点正面の通過時刻を基準とする。時刻 t_1 での自動車が発する走行音の瞬時音圧を $S(t_1)$ とする。この発生音が時刻 t_1' に観測点に達したとき、観測点における音圧 $S'(t_1')$ は距離減衰を考慮して次式で表される。

$$S'(t_1') = \frac{1}{R(t_1)} S(t_1) + \alpha \quad (1)$$

ここに $R(t_1) = \{r_0^2 + (vt_1)^2\}^{1/2}$ は時刻 t_1 での音源・観測点間水平距離であり、 α は暗騒音や周辺構造物などからの反射音の影響を表すが、本研究では、その影響は小さく、正確に評価することができないため、 $\alpha \approx 0$ とみなした。一方、時刻 t_1' は次式で表される。

$$t_1' = \frac{R(t_1)}{c_0} + t_1 \quad (2)$$

ただし c_0 は音速 (= 340m/s) である。式 (1)、(2) から次式を得る。

$$t_1 = \frac{2t_1' + \sqrt{4t_1'^2 - 4(1-m^2)(t_1'^2 - t_0^2)}}{2(1-m^2)} \quad (3)$$

ここに $m = v/c_0$ 、 $t_0 = r_0/c_0$ である。上式右辺を t_1' の関数とみなせば、 $S(t_1)$ は次の形で表せる。

$$S(t_1) = \beta(t_1') S'(t_1') \quad (4)$$

ここに $\beta(t_1')$ は観測された信号から音源信号を復元するための補正関数である。図-4(b)、図-4(c) はそれぞれ図-4(a) から式 (1)~(4) を用いて求めた補正関数 $\beta(t_1')$ と可聴化用音源信号 $S(t_1)$ である。図-4(c) では距離減衰の影響はほぼ取り除かれる。

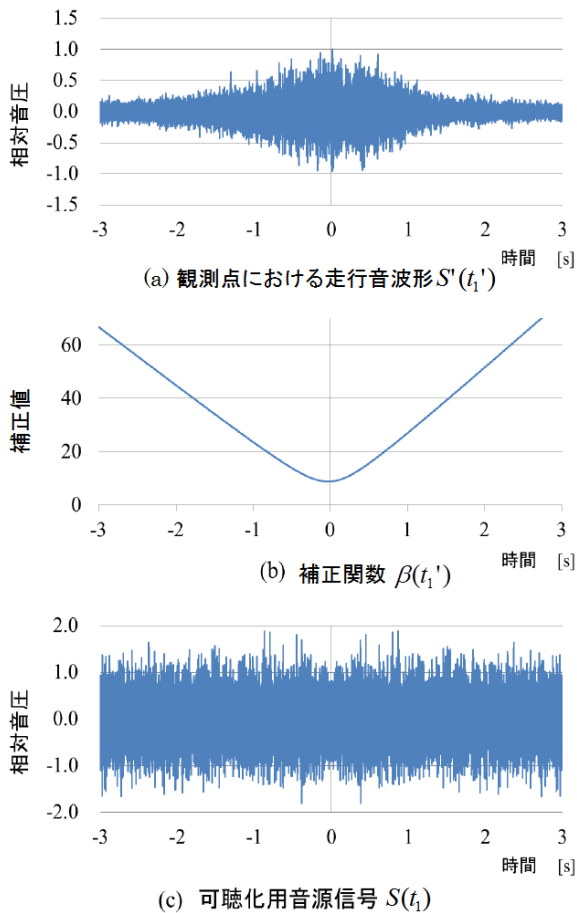


図-4 可聴化用音源信号の作成

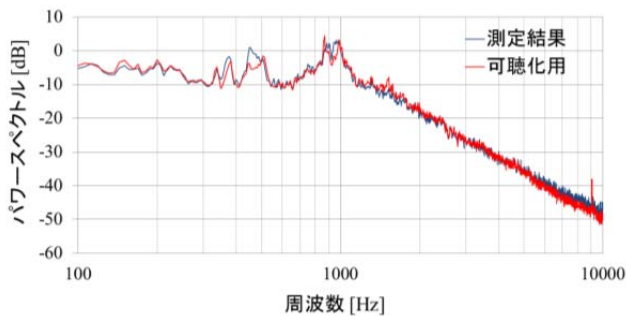


図-5 実測結果と可聴化用音源信号の比較

図-5 は測定結果と可聴化用音源信号のパワースペクトルの比較である。図-5 から両者のパワースペクトルはほぼ一致していることが分かる。なおドップラー効果の影響について、音源の周波数を f とすれば、観測点で周波数 f' は $f' = f(c_0 \pm v)/c_0$ より、 $0.93 \sim 1.08f$ となる。自動車騒音は広い周波数帯域の雑音であるため、この程度の音色の変化が聴感におよぼす影響は小さいと判断し、ドップラー効果の影響は無視した。

2.2 独自の高速計算法の採用

本システムの音響計算において、リアルタイム可聴化を行うには、高速な計算法の採用は必須である。著者らは幾何音響理論に基づく計算負荷の小さい音響計算手法を採用し、これまでに騒音の可聴化を実現している^{1),2)}。本システムではこれを応用している。本音響計算手法のベースとなっているのは、業界標準である日本音響学会の道路交通騒音予測モデル ASJ-RTN Model 2013³⁾および工事騒音の予測モデル ASJ-CN Model 2007⁴⁾（以下、両者をまとめて ASJ モデルと記す）である。ASJ モデルは音のエネルギー収支のみを扱う簡易な計算手法であり、計算量が少なく扱いやすい反面、音波の到来方向や遅延等は考慮されない。すなわち、ASJ モデルのみでは可聴化に必要な情報は不足しており、なんらかの方法で補わなければならない。

図-6 に示す防音塀（障壁）越しに到来する騒音を例に、本システムの音響計算手法について述べる。受音点から見て音源が防音塀の陰になる場合、音波は防音塀の端部から回折して到来する。音源、受音点、防音塀の位置関係などより音波の到来方向や到来時間は異なる。臨場感のある可聴化の実現のためには、音波の到来方向や到来時間の変化を反映させる必要がある。本システムでは、以下で述べる仮想音源を配置する方法を採用している。

図-6 に示すように、解析対象の音場に観測点 \mathbf{r} 、単位強さの点音源 \mathbf{r}_s 、伝播障害物 B がある場合を考える。観測点 \mathbf{r} の音圧 $P(\mathbf{r}, k)$ を次式で与えられる。

$$P(\mathbf{r}, k) = e^{ikr} / r \quad (5)$$

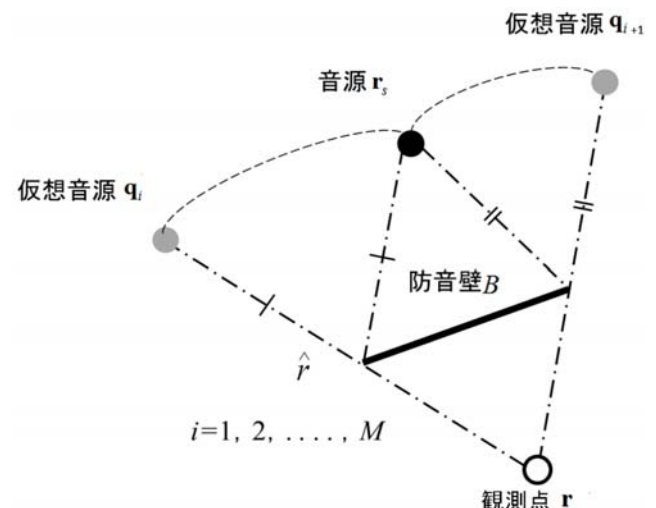


図-6 回折計算モデル

ここに r は音源・観測点距離 ($=|\mathbf{r}-\mathbf{r}_s|$)、 k は波数 ($=2\pi f/c_0$)、 f は周波数である。一方、ASJ モデルに基づく距離減衰、拡散、回折減衰を考慮した音圧レベル SPL (単位: dB) は次式で計算される。

$$\text{SPL} = \text{PWL} - 20\log_{10}(r) - 11 - \Delta D \quad (6)$$

ここに PWL は音源パワーレベル、 ΔD は回折減衰量である。また SPL は式 (5) と基準音圧 $P_0 = 20 \times 10^{-6} \text{Pa}$ を用いて次式のようにも表せる。

$$\text{SPL} = 20\log_{10}(|P(\mathbf{r}, k)| / P_0) \quad (7)$$

式(6)、(7)より次式を得る。

$$|P(\mathbf{r}, k)| = C \{(\hat{r}/r)10^{-\Delta D/20}\} / \hat{r} \quad (8)$$

ここに \hat{r} は回折パスの行路長であり、 $\{\bullet\}$ は回折減衰に関わる項を表す。また $\text{PWL} = 0$ として基準化すれば、 C は距離減衰、回折減衰のいずれにも無関係な定数として与えられる。式(7)は、実際の行路長 \hat{r} による距離減衰を考慮して $1/\hat{r}$ で括り出した形である。当然ながら、観測点から音源が直接見通せる場合は $\hat{r} = r$ 、 $\Delta D = 0$ であり、回折の影響がおよぶ場合は $\hat{r} > r$ 、 $\Delta D > 0$ である。ASJ モデルの簡易な回折計算は全周波数域に対して一つの回折減衰量を与える。本システムではこれに対し、回折減衰の周波数依存性を考慮するように次に示す前川チャート^{5),6)}の近似式により ΔD を求める。

$$\Delta D = \begin{cases} 10\log_{10} N + 13, & N \geq 1 \\ 5 \pm 9.1 \sinh^{-1}(|N|^{0.485}), & -0.322 \leq N < 1 \\ 0, & N < -0.322 \end{cases} \quad (9)$$

ここに N はフレネル数 ($=2\delta f/c_0$)、 δ は直接音と回折音の行路差 ($=|\hat{r}-r|$) である。また複号は $N < 0$ ならば (+)、 $N \geq 0$ ならば (-) を表す。

図-6 に示すように観測点と回折点を結ぶ直線上に仮想的な2次音源 \mathbf{q}_i 、 $i=1, 2, \dots, M$ (M は回折点の数) を考える。このとき \mathbf{q}_i と観測点の距離を \hat{r}_i とすると、仮想音源 \mathbf{q}_i から到来する音波 p_i は式(5)と同様に次式で表される。

$$p_i = Q e^{ik\hat{r}_i} / \hat{r}_i, \quad Q = \{(\hat{r}_i/r)10^{-\Delta D/20}\} \quad (10)$$

ここに Q は振幅の増幅率である。すなわち、式(10)は、距離減衰を実際に行路長 \hat{r}_i を用いて表し、回折

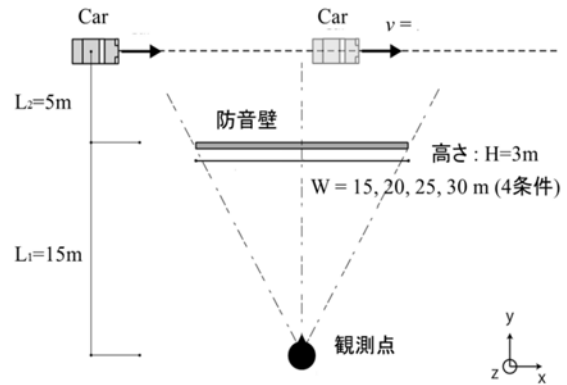


図-7 自動車走行音計算条件

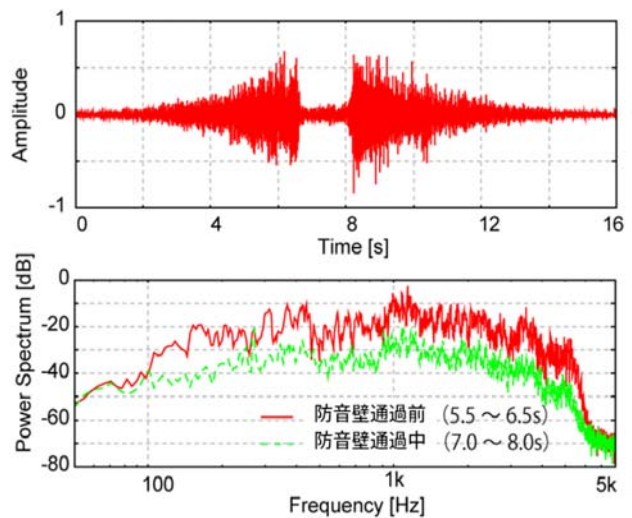


図-8 自動車走行音の計算結果 ($W = 15\text{m}$)
上: 音圧、下: パワースペクトル

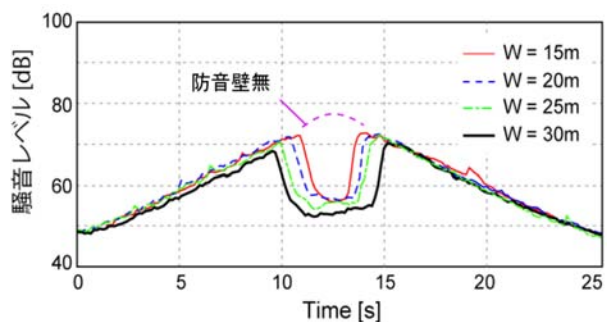


図-9 自動車走行時の騒音レベルの変化

減衰を振幅の増幅率として表現した形である。当然ながら、観測点での音圧は M 個の仮想音源からの寄与を合成して得られる。なお、このモデルは音波の位相変化は考慮していない。これは、ノイズ成分の多い交通騒音の評価において位相変化が及ぼす影響は小さいためである。

以上の計算法により、iPad のような小型のコンピュータでも実用上十分な速度で可聴化できる。本計

算手法の検証用モデルとして図-7 を考える。音源である自動車は地盤面 $z=0$ 上に x 方向に速度 v で移動する。また幅 W 、高さ H の防音壁があるとす。ただし防音壁の厚みは無視する。観測点から防音壁までの距離は L_1 、防音壁から音源までの最短距離は L_2 である。自動車が防音壁の陰にあるとき、回折音は防音壁の上方および側方から到来するとす。2.1 節の方法により生成した音源信号を用いて自動車が防音壁近傍を通過する際の騒音を上述の計算法により求めた。なお防音壁幅 $W=15、20、25、30\text{m}$ の4条件、高さ $H=3\text{m}$ とした。図-8 は、 $W=15\text{m}$ 時の観測点における音圧計算結果とそのパワースペクトルを表す。走行自動車が防音壁の陰になる約 $7.0\sim 8.0\text{s}$ では回折減衰の影響が見られ、約 100Hz 以上の周波数で回折減衰の影響が大きいことがわかる。また図-9 は、音圧計算結果から求めた騒音レベルである。防音壁の幅が大きいほど回折の影響で騒音レベルが低減する区間が長く、回折減衰量も大きい。この回折減衰量と別途 ASJ モデルのみで求めた回折減衰量との差は最大でも $\pm 2\text{dB}$ であった。本システムによる騒音予測値は ASJ モデルと同程度であり、実用上十分可能であることが確認された。

2.3 可聴化手法

本システムの可聴化手法はモノラル、振幅パニング(受聴者が複数の場合、スピーカ再生向け)、HRTF(頭部伝達関数)を用いたバイノーラル再生⁸⁾(受聴者が一人の場合、ヘッドホン再生向け)の三種に対応しており、使用状況に適した可聴化が可能である。モノラル再生は最も計算負荷が小さくて済む。

振幅パニングは、左右のスピーカの出力を個別に制御することで方向感を出す方法である。自動車走行など音源が移動する場合には時々刻々音像の定位位置が変化するため臨場感を得やすい。図-10 は、2チャンネル再生時の振幅パニングの概念を表す。前述の音響計算結果を係数 W_L と W_R で重み付けして、LR 各チャンネルに振り分ける。これらの重み係数は sine law、つまり次の関係を満たすものとする⁷⁾。

$$\frac{\sin \varphi}{\sin \varphi_0} = \frac{W_L - W_R}{W_L + W_R} \quad (11)$$

図-10 に示すように φ 、 φ_0 は観測者正面を基準にした音像およびスピーカの位置(角度)である。

一方、HRTF によるバイノーラル再生は、図-11 に示すように、振幅パニングの W_L と W_R による重み付けに代えて HRTF を用いた畳み込み演算を行い、再生信号を生成する方法である。HRTF は耳

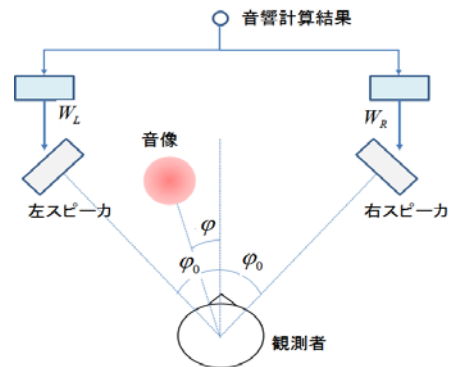


図-10 振幅パニングによる音像の定位

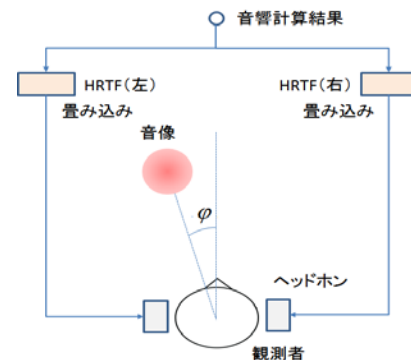


図-11 HRTF を用いたバイノーラル再生

殻、人頭および肩まで含めた周辺物により生じる音の変化を伝達関数として表現したものである。HRTF は多くの研究機関で計測されているが、本システムでは MIT KEMAR (Knowles Electronics Manikin for Acoustic Research)の HRTF⁸⁾を用いている。HRTF による可聴化では原理的に音像定位の左右、前後、上下の区別も可能となる。HRTF は観測者から見た音源または仮想音源の方向(方位角、仰角)により異なる。本システムでは音源の方向が変化する度に該当角度の LR 各チャンネル用の HRTF をメモリ上のデータベースから呼び出す。また畳み込み演算には計算量が比較的小さくて済むように、周波数領域における畳み込み演算法である重畳加算法 (Overlap-Add method)を採用している⁹⁾。これにより、HRTF 切り替え時に再生音に生じるノイズ(あるいは音飛び)を軽減できる。

3. 本システムの活用のイメージ

図-12 は本システムの活用イメージであり、実際に二つの現場において、これと同様に活用された。以下にその手順を述べる。

- ① 騒音対策案立案：現場担当者が現場内の対象となる騒音源を定め、防音塀配置などを計画する。
- ② シミュレーション条件の設定：上記対策案にもとづく計算条件を入力する（所要時間：10～15分程度）。
- ③ 対策効果を音として体感：発注者や周辺住民に騒音対策案を説明する機会などで、本システムによる可聴化を行い、騒音発生状況や対策による騒音低減効果を確認する。発注者や周辺住民から要望があれば、騒音源の種類や防音塀の配置の変更など条件変更を行って、再度可聴化し、その変化を耳で聴いて確認する。
- ④ ①～③を繰り返しながら、発注者や周辺住民との合意形成を図り、騒音対策を策定する。
- ⑤ ④の騒音対策を実施する。

4. おわりに

本システムは、騒音対策支援のための可聴化システムである。建築・土木工事現場での活用を前提とし、小型で扱いやすく、聴く人（発注者や住民など）の要望に応じて柔軟に条件を変更できる。

今後、現場適用を通じてデータベースの拡充、並びに、地形や建物群の考慮などのシステムのブラッシュアップを図る。更に工事騒音やその対策に対して「どれくらい不快か」、「どの程度不快さが軽減されるか」といった音質の評価に対応できるようにしていきたい。

謝辞

中央大学檜山和男教授よりVR技術、可聴化に関してご指導を受けた。ここに感謝の意を表する。

<参考文献>

- 1) 谷川将規、守屋陽平、江嶋孝、檜山和男、志村 正幸：VR技術を利用した道路交通騒音評価システムの立体音響化と現実感向上に関する研究、土木学会論文集 A2(応用力学)、Vol.69、pp.155-262、2013。
- 2) 柴田啓輔、田近伸二、檜山和男、志村正幸：可視化・可聴化技術を用いた道路交通騒音評価システムの構築、土木情報利用技術講演集、土木学会、Vol.36、pp.33-36、2010。
- 3) 日本音響学会道路交通騒音調査研究委員会：道路交通騒音の予測モデル"ASJ RTN-Model 2013"、日本音響学会誌、Vol.70、pp.172-230、2014。
- 4) 日本音響学会建設工事騒音予測調査研究委員会、橘秀樹：建設工事騒音の予測モデル"ASJ CN-Model 2007"、日本音響学会誌、Vol.64、pp.229-260、2008。
- 5) 前川純一、阪上公博、森本政之：建築・環境音響学、共立出版、2000。
- 6) 日本音響学会（編）：音環境の数値シミュレーション—波動音響解析の技法と応用—、丸善、2011。
- 7) V. Pulki: "Virtual Sound Source Positioning Using Vector Base Amplitude Panning"、Journal Audio Engineering Society、Vol.45、1997。
- 8) HRTF Measurements of a KEMAR Dummy-Head Microphone: "http://sound.media.mit.edu/resources/KEMAR.html"
- 9) M. H. Horace: "Digital Signal Processing. Schaum's Outline Series", McGraw Hill, 1999。

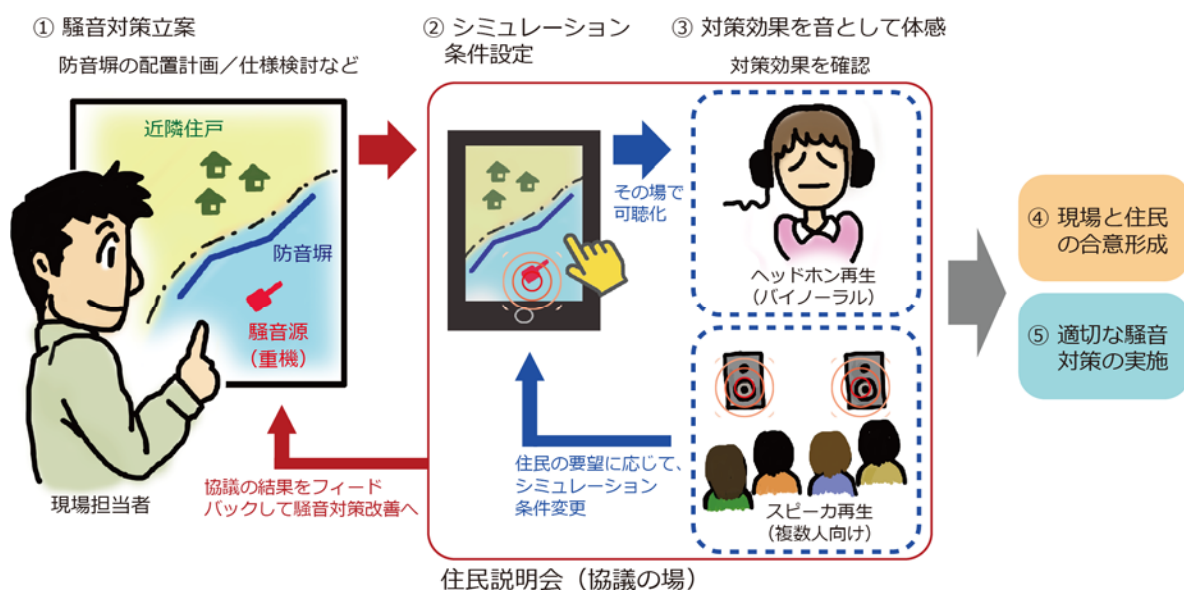


図-12 本システム活用のイメージ