

幾何音響理論に基づく鉄道騒音予測とVR技術を用いた可視化・可聴化

中央大学 木下 公二
JSOL 吉町 徹
中央大学 檜山 和男
建設環境研究所 志村 正幸

1. はじめに

騒音は不快感、聴取妨害、睡眠休養妨害といった感覚的・精神的・心理的な被害と、聴力損失、頭痛、胃腸障害といった身体的被害を引き起こす。また、鉄道事業においては新線建設や高架化などが数多く行われており、事業の設計・計画段階において騒音の影響予測を行うことは重要であり、音響数値シミュレーションが有効に利用されている。しかし、シミュレーション結果の提示方法としては音圧分布をCGによって可視化されるのが一般的で可聴化までは行なえていないのが現状であった。また、CGによる騒音の可視化は音圧レベルの具体的な数値や影響範囲の把握には有効であるが、実際に聞こえる音の大きさを直感的に理解するのは困難である。

そこで著者らは既往の研究において、近年発展・普及の著しいVR (Virtual Reality) 技術を用いて、視覚情報と聴覚情報を同時に提示し体験者に臨場感のある疑似体験が可能な鉄道騒音評価システムの構築^{1) 2)}を行ってきた。このシステムは、今まで専門家以外では難しかった音圧レベルの理解を容易にしており、今後、鉄道の新規計画や防音対策において設計者間や住民との合意形成に有効的に用いられることが期待される。

本研究では、既往の鉄道騒音評価システムの適用性を向上させるために、幾何音響理論に基づく音圧レベルの計算式に指向性の効果の導入を行った。本システムの妥当性と有効性の検討のために、指向性の考慮の有無について計算値と実測値との比較を行った。また、計算値とVR空間において可聴化した測定結果との比較をそれぞれ行った。次に、鉄道騒音の空間分布の把握を容易にするために、音圧レベルの等値面を描画することで騒音の可視化を行い、指向性考慮の有無の比較を通して有効性の検討を行った。

2. 鉄道騒音評価システム

2.1 VR環境

本研究では、図-1に示す没入型VR装置HoloStageを用いる。本装置は前面と側面及び底面の3面の大型スクリーンとそれぞれに対応した高性能プロジェクター、VR空間内の利用者の動きを捉えるためのワイヤレストラッキング装置、及びそれらを制御する並列計算機から構成されている。立体視方式として液晶シャッター方式を採用しており、利用者は液晶シャッター眼鏡をかけ底面のスクリーンの上に立つことにより、VR空間への没入感を得ることが可能となっている。本装置は、図-2に示す液晶シャッター眼鏡とコントローラーに付属するマーカーと呼ばれるヘッドトラッキング装置によって位置座標・視点



図-1 没入型VR装置HoloStage



液晶シャッター眼鏡

コントローラー

図-2 周辺機器

方向を逐次計算し、利用者のVR空間内での動きをリアルタイムに捉えている。また、底面スクリーンを囲うように天井に設置された、7.1チャンネルまで再生可能な7つのスピーカーにより聴覚情報を提示することが可能となっている。このスピーカーによって移動音源の指向性も再現できるため、臨場感のある可聴化結果を体感することができる。

2.2 システム概要

本システムのフローチャートを図-3に示す。まず、車両の走行速度などの走行条件や音源の音響パワーレベル、可視化のためのメッシュデータ、地形や構造物の幾何情報といった入力データを設定する。そして、各時間ループにおいて、鉄道車両の音源位置の座標位置を算出するとともに、受音点となるVR空間内の観測者の位置情報をトラッキング装置により取得する。それらの情報を用いて可視化と可聴化は同時に行われ、可視化ではC++用のライブラリGLMeataseq^{3, 4)}を用いて鉄道車両のCGや

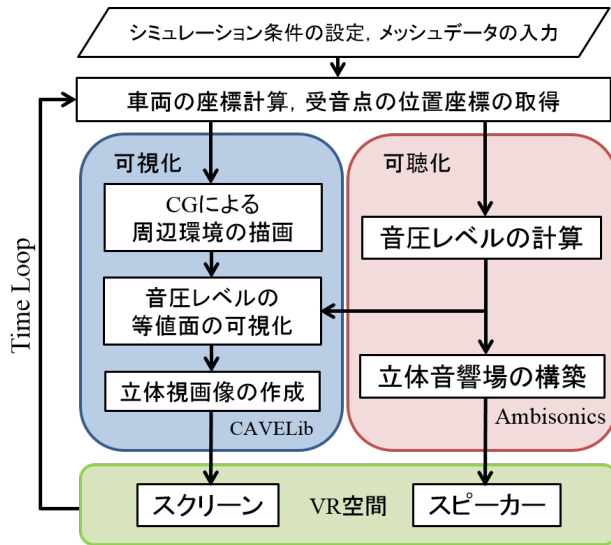


図-3 本システムの構成

対象地域の周辺環境の地形・構造物モデルの描画を行い、CAVE ライブラリを使用することで立体映像を出力する。一方、可聴化部では、後述する幾何音響理論に基づくモデルにより利用者位置における騒音レベルを計算する。そして、その計算結果を音響プログラミングソフト Max を用いたプログラムにより、音響計算結果に基づく立体音響信号を提示する。なお、立体音響場の構築には球面調和関数展開法に基づく Ambisonics 手法⁵⁾を用いている。また、可視化と可聴化情報の共有には、OSC (Open Sound Control) プロトコルを用いた UDP/IP 通信によって行われている。なお、本システムは CAVE と呼ばれる没入型 VR システムに対して実装が可能である。

2.3 幾何音響理論による音響計算

鉄道騒音の予測評価手法としては、これまで多くの手法が提案されている⁶⁾が、従来の予測方法の多くは、走行音を線音源で近似した場合の騒音レベルの最大値や等価騒音レベルを算出するための方法がほとんどであり、リアルタイムシミュレーションで必要とする非定常の音圧レベルの算出にそのまま適用するのは困難である。そこで本研究では、騒音レベルの時間的変化を算定するために幾何音響理論に基づく計算式を使用する。鉄道の音源は車輪がレール上を回転する際の転動音、高架橋の振動による構造物音、冷却ファンやモーター等の車両機器音などの騒音が複合したもの（以下走行音とする）とレール継ぎ目などの不連続面によって生じる音（以下打撃音とする）に大別される⁷⁾が、本研究では、走行音について実際に騒音計を用いて取得・作成した定常音の音源データを VR システムに実装する。定常音の作成方法等の詳細に関しては参考文献 1) を参照されたい。

本研究では、鉄道走行音の伝搬計算に音源を半自由空間における点音源として取扱う幾何音響理論に基づく計算モデル "ASJ RTN-Model 2013"⁸⁾を用いた。走行音の

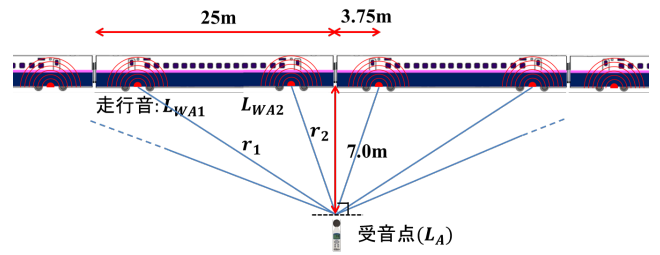


図-4 走行音の配置図

音源は、各車両ごとに作成した定常音を各台車の中央に配置しており、車両と共に移動する点音源として扱う。図-4に走行音の配置図を示す。

軌道上の車両の台車から観測点に到達するエネルギー密度は次式で表される。

$$E_i = \frac{WQ_i}{2\pi r_i^2 c} \quad (1)$$

ここで、 W は音響パワー、 Q は指向性係数、 r は台車から観測点の距離である。上式を音圧レベル表示すると次式となる⁶⁾。

$$L_A = L_{WA} - 8 - 20 \log_{10} r + \Delta L_{dir} + \Delta L_{cor} \quad (2)$$

ここで、 L_A は観測点での音圧レベル [dB]、 L_{WA} は音源の音響パワーレベル [dB]、 ΔL_{dir} は指向性に関する補正項、 ΔL_{cor} は音源から受音点に至る音の伝播に影響を与える各種補正項である。本研究では各種補正項 ΔL_{cor} については回折減衰についてのみ考慮している。本システムでは、コントローラ操作によって遮音壁をリアルタイムで描画を行うことができる機能を有しており、その際に回折減衰計算が適用される。詳しくは参考文献 1)2) を参照されたい。指向性については、詳しく後述する。

また、受音点における音圧レベルは各音源からの伝搬音の音圧レベルの合成値であり、次式で表わされる。

$$L_A = 10 \log_{10} \Sigma (10^{L_{A,i}/10}) \quad (3)$$

ここで、 i は合成する音源の数（音線の数）である。走行音と受音点の位置関係を図-4 に示す。本研究においては鉄道車両として、観測した新幹線車両である E2 系を用いており、規格は、車両全長が 25m、台車の中央から車両の端までの距離が 3.75m である。また、本システムでは車両編成の考慮も行う。車両をモーター車、先頭車両、最後尾車両の 3 種に分け、実測結果から音響パワーレベルを 114dB、119dB、113dB と算出してそれぞれ用いた。

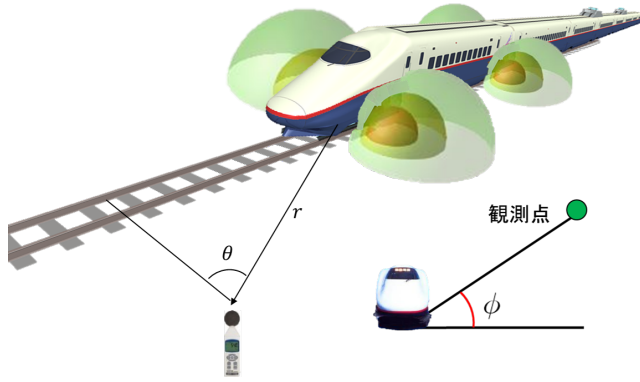


図-5 音源と観測点の位置関係

2.3.1 指向性による補正

鉄道の走行音は走行ライン方向及び上方には騒音が伝搬しやすく側面方向には伝搬しやすい、双指向性を持つことが知られている⁹⁾。鉄道騒音においてはその考慮が非常に重要であるため本研究では指向性を有する点音源として扱い、以下の指向性モデルを適用する。

$$\Delta L_{dir} = 10 \log_{10}(\cos^n \theta \cdot (0.1 + 0.9 \cos \phi)) \quad (4)$$

ここで、 θ は観測者から見た走行ラインへの最短地点を基点とした音源への角度、 ϕ は音源から見た観測点への仰角、 n は指向性係数である。指向性係数は値を変化させることで指向性の強さを変化させることができ、値が大きいほど指向性が強くなる。 θ 及び ϕ の値は台車と観測点の位置座標から計算しており、図-5 にその位置関係を示す。

2.4 音圧レベルの等値面の可視化

本システムでは、騒音の影響範囲をより容易に把握できるようにするために指定した騒音レベルの等値面の描画を行っている。

騒音レベルの等値面の描画を行うために、前処理として事前に生成したメッシュデータの入力を行っている。本シミュレーションでは節点数約 780 万点の四面体メッシュデータ (水平・鉛直・高さ方向各 0.5 m 間隔) を入力した。

等値面の作成工程では、一つ一つの要素に注目して処理を行う。まず表示する音圧レベルを含む要素を検索し、各要素辺上で表示する音圧レベルの位置を要素の節点値から一次補間により求め、三角形ポリゴンを用いて結ぶことによって各要素ごとに等値面を作成する (図-6)。表示したい音圧レベルを含む音圧レベルを含むすべての要素で同様の処理を行うことで鉄道騒音の等値面の形状を算出することができる。なお、本システムでは、OpenGL を用いて等値面の描画を行っている。

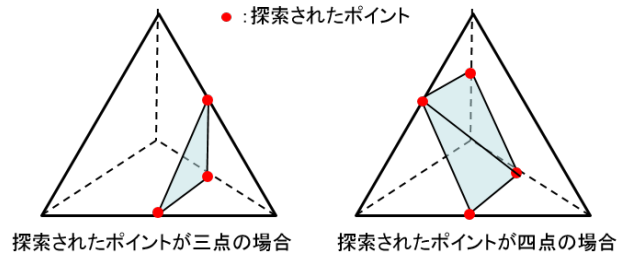


図-6 各要素ごとの等値面の作成

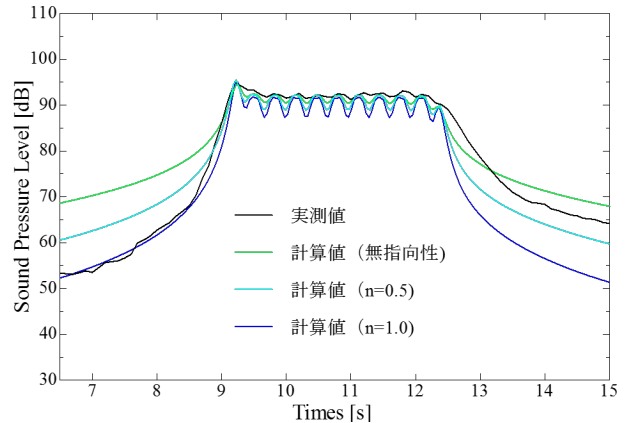


図-7 本システムの計算値と実測値の比較

3. 適用例

本システムの妥当性・有効性を検討するために、東北新幹線 E2 系車両を適用例として、可聴化シミュレーション及び可視化シミュレーションを行った。

3.1 可聴化シミュレーション

本システムの計算値において、指向性係数 n の値を變化させて実測値との比較をそれぞれ行った。図-7 に音圧レベルの時刻歴の比較を示す。黒線が実測値であり、緑色・水色・青色の実線がそれぞれ指向性係数を $n = 0, 0.5, 1.0$ とした計算値を示す。鉄道車両の接近時においては $n=1.0$ のときの値が実測値と良い一致を示しており、また、通過後に関しては約 10dB の差異が生じている。新幹線の指向性において車両接近中と通過後では異なる特徴を示しており、より適切な指向性モデルの導入や、接近時と通過後での指向性係数の区別が必要であると考えられる。

次に本システムによる計算値と VR 空間内での計測結果の比較を行った。図-8 に両者の比較を示す。青線は本手法による計算値、赤線は VR 空間での計測値である。図より、暗騒音以上については両者は良い一致が示されており、計算通りの音場が再現できていることが確認できる。

3.2 可視化シミュレーション

鉄道騒音の空間的広がり の把握を容易にするため、音圧レベルの可視化を行い、指向性考慮の有無の比較を通して

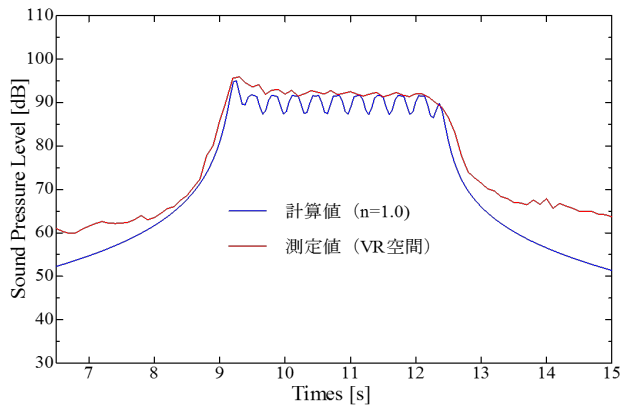


図-8 計算値と VR 空間における可聴化結果の比較

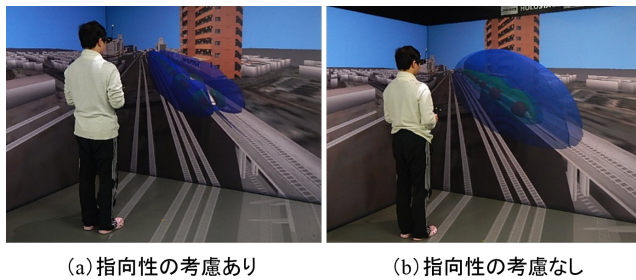


図-9 可視化結果 1

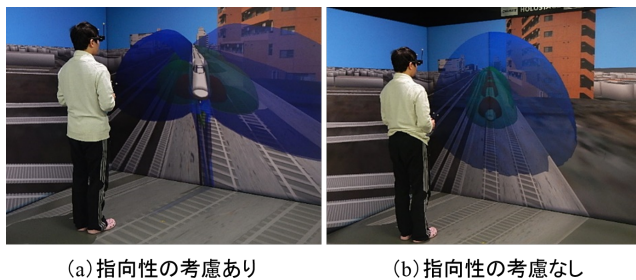


図-10 可視化結果 2

有効性の検討を行う。図-9、図-10 に可視化結果を示す。それぞれ (a) 指向性を考慮した可視化結果、(b) が指向性を考慮していない可視化結果である。描画した等値面の音圧レベルは 95, 100, 105dB の 3 つであり、それぞれ青、緑、赤で描画を行った。

図-9 は鉄道車両を斜め上方から観察している様子であり、指向性を考慮することによって、進行方向への音圧レベルの伝搬が抑えられている様子が確認できる。また、図-10 は鉄道車両を正面から観察している様子であり、同様に上方への音圧レベルの伝搬が抑えられている様子が確認できる。音圧レベルの等値面を可視化表示することで、鉄道騒音の音圧レベルの空間分布を容易に把握可能となった。

4. おわりに

本研究では、既往の鉄道騒音評価システムの適用性を向上させるために、幾何音響理論に基づく音圧レベルの計算式に指向性の効果の導入を行った。本システムの妥当性と有効性の検討のために、指向性の考慮の有無について計算値と実測値との比較を行った。また、計算値と VR 空間において可聴化した測定結果との比較をそれぞれ行った。次に、鉄道騒音の空間分布の把握を容易にするために、音圧レベルの等値面を描画することで騒音の可視化を行い、指向性考慮の有無の比較を通して有効性の検討を行った。その結果、以下の結論を得た。

- 指向性モデルを適用することによって、接近中においては鉄道騒音の指向性を再現することができた。しかし、通過後においては差異が生じており、より適切な指向性モデル等の導入の必要が挙げられる。
- 本手法の計算結果と VR 空間での計測値が良い一致を示し、VR 空間においてほぼ計算通りの音場が再現された。
- 可視化機能の実装を行ったことで、騒音の空間的広がりを直感的に評価することが可能となった

今後の課題として、より適切な指向性モデルの導入や、持ち運びを可能にするためにヘッドマウントディスプレイへの適用等が挙げられる。

参考文献

- 1) 木下公二, 吉町徹, 櫻山和男, 志村正幸: VR 技術を用いた鉄道騒音評価システムに関する研究, 土木情報学シンポジウム講演集, 土木学会, Vol.42, pp.243-246, 2017.
- 2) 吉町徹, 櫻山和男: 幾何音響理論に基づく鉄道騒音予測と VR 技術を用いた可聴化, 第 20 回鉄道工学シンポジウム, 2016.
- 3) 橋本直: 工学ナビ ARToolKit を使った拡張現実感プログラミング, <<http://kougaku-navi.net/ARToolKit/>>, (入手 2015.5.2).
- 4) Kageyama, A. and Masada, Y.: Applications and a three-dimensional desktop environment for an immersive virtual reality system,
- 5) Ward, D. B. and Abhayapala, T. D.: Reproduction of a Plane-Wave Sound Field Using an Array of Loudspeakers, *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing*, Vol.9 No.6, Sept 2001.
- 6) 石井聖光, 子安勝, 長裕二, 木庭啓紀: 在来線高架鉄道からの騒音予測手法案について, 日本騒音制御工学会技術発表会講演論文集, 騒音制御, Vol.4 pp.64-70, 1980.
- 7) 森藤良夫, 長倉清, 立川裕隆, 緒方正剛: 在来線鉄道騒音の予測評価手法について, 日本騒音制御工学会技術発表会講演論文集, 騒音制御, Vol.20(3), pp.146-151, 1996.
- 8) 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.
- 9) 買手正浩: 外部騒音に対する遮音設計手法, 大成建設技術センター報 第 43 号, 2010.