

(23) VR技術を用いた 鉄道騒音評価システムに関する研究

木下 公二¹・吉町 徹²・檜山 和男³

¹学生会員 中央大学大学院 理工学研究科都市人間環境学専攻 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

E-mail: a12.h7bw@g.chuo-u.ac.jp

²正会員 株式会社 JSOL エンジニアリングビジネス事業部 (〒104-0053 東京都中央区晴海 2-5-24)

E-mail: toru.yoshimachi@g.chuo-u.ac.jp

³正会員 中央大学教授 理工学部都市環境学科 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

E-mail: kaz@civil.chuo-u.ac.jp

本論文は、VR(バーチャルリアリティ)技術を用いた幾何音響理論に基づく鉄道騒音評価システムの構築を行ったものである。本システムは、VR空間内の利用者の位置情報を用いてVR空間内においてリアルタイムに騒音レベルを算出し、鉄道の走行CG映像とともに騒音レベルを実際の音源データを用いて可聴化することで、鉄道騒音を視覚と聴覚の両面から体験可能なシステムである。本システムの精度の向上を目的として、各車両ごとに音源データの作成を行い実装し、VR空間内において計算結果と測定結果の比較を行った。また、防音対策の効果について評価可能にするため、システムへの遮音壁の実装を行った。

Key Words: virtual reality, geometrical acoustics, railway noise

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。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、実際に聞け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き、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。なお、計算手法についてはリアルタイムでの計算が可能である幾何音響理論に基づく手法が採用している。

しかし、従来のシステムでは、走行音として各車両には同一の音源データが用いられており車両編成の考慮

がなされていないという問題があった。そこで本論文では、より品質の高いシステムの構築を目指して、車両をモーター車と非モーター車とに区別して在来線に対して車両編成を考慮した音源の実装を行う。また、防音対策の効果について評価可能にするため、システムへの遮音壁の実装を行った。本手法の妥当性と有効性を検討するため、車両編成考慮の有無における計算結果の比較を実測値との比較をもとに行なった。また、騒音レベルの計算結果を可聴化し、計算結果とVR空間における測定結果の比較を行った。

2. 鉄道騒音評価システム

(1) システム概要

本システムの処理工程を図-1に示す。本システムは、可聴化部と可視化部から構成されている。各時間ステップにおいて、可聴化部では、まずトラッキング装置によって取得した音源及び観測点の位置座標から距離と水平角度の計算を行う。そして音圧レベルの計算を行い、実際の鉄道騒音を用いて鉄道の走行音の可聴化を行う。なお、立体音響場の提示には音響プログラミングソフトMaxを用いてスピーカーの制御を行い、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³⁾を用いている。また、計算された観測点での音圧レベルをOSC(Open Sound Control)を用いてMaxに送信して、その値に基づきスピーカーの再生音量及び立体音響を制御している。一方可視化部は、操作者の視点

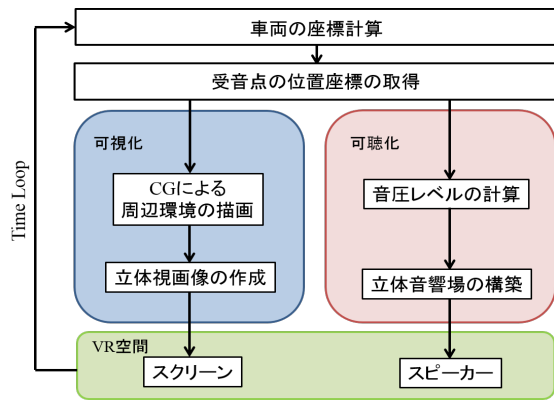


図-1 本システムの処理工程

からの立体映像の作成を行う。なお、コントローラーの操作にはプログラムインターフェースである CAVELib を使用している。列車と周辺環境の立体 CG の作成と各スクリーンへの投影は、CaveLib と OpenGL によるプログラムにより行い、VR 空間の構築を行っている。

(2) 走行音の測定・定常音の作成

本 VR システムでは、車両ごとの走行音を実装するために、実際に走行している在来線鉄道の音源データの取得を JR 川越線南古谷駅周辺（埼玉県川越市）で行った。走行音の測定はレールのつなぎ目から十分離れた打撃音の影響のない箇所で行い、走行ライン（レールの中心）から 9m 離れた場所で行った。

車両ごとの可聴化用音源データの作成のために、走行音をモーター車と非モーター車に分ける必要がある。図-2(a) に走行音の測定を行った川越線の車両編成を、図-2(b) に 83km/h で通過した際の波形表示を示す。図-2(a) において、モハはモーター車、クハ・サハは非モーター車である。また、図-2(b) において、赤い点が台車の位置であり、モはモーター車を示している。次に、図-2(b) の走行音の音源データから、モーター車・非モーター車に該当する部分のみを、それぞれ取り出して定常音を作成した。図中、赤い枠内がモーター車の定常化に使用した音源データ部位であり、紫色の枠内が非モーター車の定常音化に使用した音源データ部位である。定常音作成の詳細については参考文献⁴⁾を詳細されたい。

作成したモーター車と非モーター車の定常音の周波数ごとの音響パワースペクトルの比較を図-3 に示す。なお、周波数分析の重み付け特性はフラットで行った。図より、周波数が低い領域においては、モーター車の音響パワーレベルが卓越しており、周波数が高い領域では定量的に差異がないことが確認できる。低周波帯においてモーター車の周波数特性が再現されており、周波数特性に影響を与えることなく定常音が作成されていることがわかる。

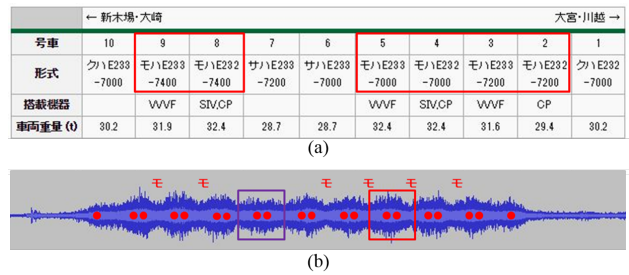


図-2 車両編成とモーター配置及び音圧の波形表示

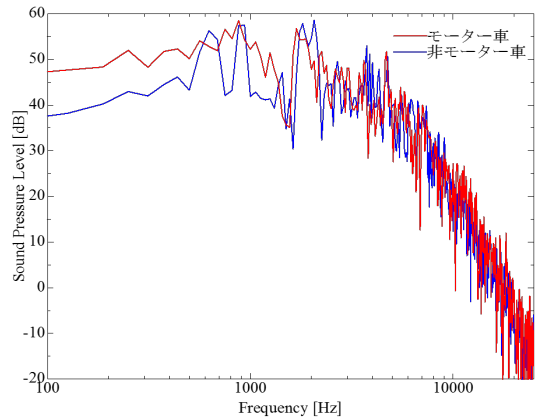


図-3 音響パワースペクトルの比較

(3) 音源のモデル化

本論文では、在来線の走行音を地表面の反射の影響を考慮した幾何音響理論に基づく半自由空間における点音源として取扱い⁵⁾、観測点における音圧レベルを次式で表わす。

$$L_A = L_{WA} - 8 - 20 \log_{10} r + \Delta L_{cor} \quad (1)$$

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]、 r は音源から観測点までの距離 [m]、 ΔL_{cor} は音源から受信点に至る音の伝播に影響を与える各種補正項であり以下に示す (2) 式で示される。

$$\Delta L_{cor} = \Delta L_{dif} + \Delta L_{grnd} + \Delta L_{air} \quad (2)$$

ここで、 ΔL_{dif} は回折減衰による補正量 [dB]、 ΔL_{grnd} は地表面効果による減衰に伴う補正量 [dB]、 ΔL_{air} は空気減衰量に伴う補正量 [dB] である。本論文では補正量は回折減衰についてのみ考慮している。また、鉄道騒音については音源の指向性が重要であり、その考慮を行っている。指向性については参考文献⁴⁾を参照されたい。

各車両ごとに作成した定常音をモーター車及び非モーター車に相当する各台車の中央部分に配置した。走行音の音源の配置方法及び走行ラインと受信点の位置関係を図-4 に示す。なお、モーター車、非モーター車の音響パワーレベルは、実測結果からそれぞれ 107dB、103dB

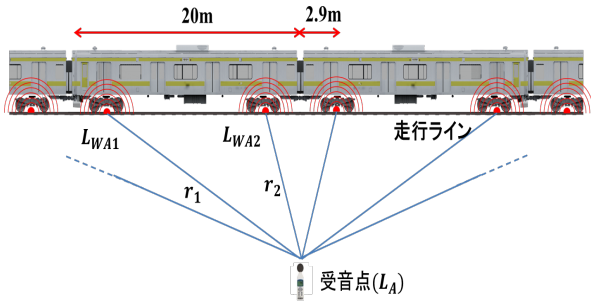


図-4 各音源と受音点の位置関係

と計算された。

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。

(4) 遮音壁による減衰効果

鉄道の騒音対策の中でも遮音壁は騒音が沿線に直接伝わることを防ぐ装置であり、特に車両下部から発生する騒音に対して非常に有効な対策である。そこで、防音対策の効果について評価可能にするため、システムへの遮音壁の実装を行った。以下に計算方法の詳細について記す。

遮音壁などの音響障害物による回折補正量 ΔL_{dif} は、回折経路差 δ から求まる基本量 ΔL_d を用いて算出する⁵⁾。回折補正計算の基本量 ΔL_d は、点音源 S 、回折点 O 、観測点 P に関する回折経路差 δ [m] を用いて式 (4) で計算する。図-5 に回折計算を行う際に用いる δ の定義について示す、

$$\Delta L_d = \begin{cases} -20 - 10 \lg(c_{spec} \delta) & c_{spec} \delta \geq 1 \\ -5 - 17.0 \cdot \sinh^{-1}(c_{spec} \delta)^{0.414} & 0 \leq c_{spec} \delta < 1 \\ \min[0, -5 + 17.0 \cdot \sinh^{-1}(c_{spec} |\delta|)^{0.414}] & c_{spec} \delta < 0 \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 C_{spec} は騒音の分類によって変化する係数である。また、 $\min[a,b]$ は数値 a,b のうち小さい値を表す。なお、本シミュレーションでは直立遮音壁を採用しているため、 $\Delta L_d = \Delta L_{dif}$ として扱う。

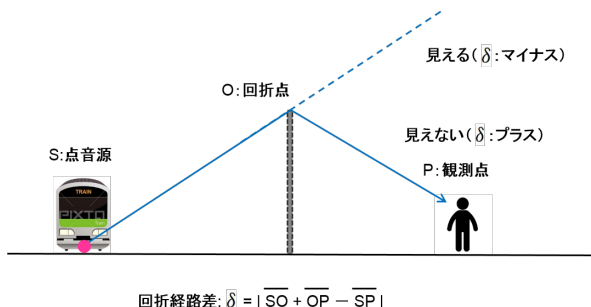


図-5 回折経路差 δ の定義



図-6 シミュレーション対象の地域モデル

3. VR 空間への 3D モデル投影

本論文では、JR 川越線南古谷駅周辺 (埼玉県川越市) を対象として地形モデルと鉄道構造物モデルを 3DCG モデリングソフトウェア用いて作成し、VR 空間への投影を行っている。対象地域モデルは、国土地理院により提供されている基盤地図情報 (地形データと建物データ)、線路の軌道データ及び航空写真を用いて作成を行った。

図-6 に作成した地域モデルを示す

4. 適用例

本システムの妥当性の検証を行うため、川越線において実際の鉄道騒音の実測値と本手法による計算結果を比較した。本シミュレーションの条件を実測と同じにするため、VR 空間における列車の走行速度は時速 83km、観測点は走行ライン (レールの中心) から 9m 離れた地点に設けた。

図-7 に実測値と計算値の車両編成考慮の有無における比較を示す。なお、式 (1) の音源の音響パワーレベルは、実測結果より、非モーター車では L_{WA} は 103dB、モーター車では L_{WA} は 107dB と仮定した。図-7 より、すべての車両をモーター車と仮定した場合には、モーター車の位置のみで実測値と良い一致が見られるのに対し、全ての車両を非モーター車と仮定した場合には非モーター車の位置のみで一致が見られることがわかる。一方、車両編成を考慮した場合には、すべての車両位置において計算結果は実測値と良い一致を示していることがわかる。

図-8 に本手法の計算結果と VR 空間での計測値の比較を示す。図より、両者は実測値との比較同様よい一致が示されており、可聴化が正しく行われていることが確認できる。

図-9 に遮音壁を設置した場合のシステムを体験している様子を示す。図-10 は遮音壁の有無による計算結果の比較である。なお、計算結果は車両編成を考慮した音響パワーレベルを使用した。図より、遮音壁を設置し

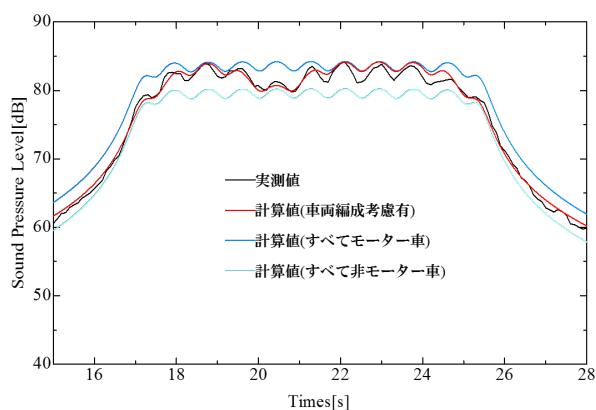


図-7 実測値と計算値の車両編成考慮の有無における比較

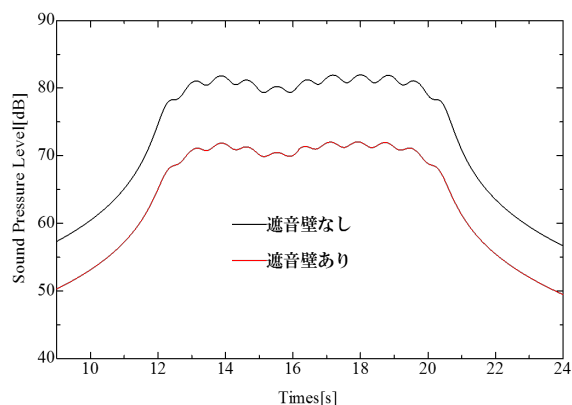


図-10 遮音壁の有無による計算結果の比較

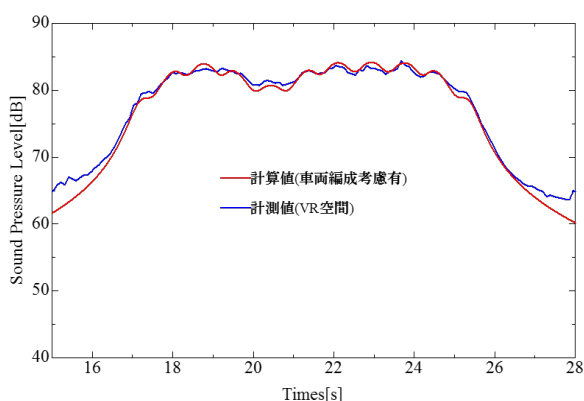


図-8 計算値と VR 空間における可聴化結果の比較

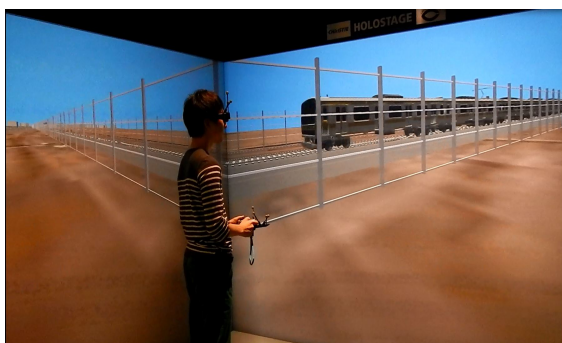


図-9 システムを体験している様子

た場合には回折による減衰効果が確認できる。

5. おわりに

本論文では、既往の鉄道騒音評価システムをベースとして、より品質度の高いシステムの構築を目指し、車両編成を考慮した音源の実装を行った。また、防音対策の効果について評価可能にするため、システムへの遮

音壁の実装を行った。

本手法の妥当性と有効性を検討するため、車両編成の考慮の有無において計算結果の比較を実測値との比較をもとに行った。また、騒音レベルの計算結果を可聴化し、計算結果と VR 空間における測定結果の比較を行った。その結果、以下の結論を得た。

- 本手法による計算値と実測値がよい一致を示し、車両編成の考慮によって計算の精度の向上が実現でき、より品質の高い鉄道騒音の体験が可能となった
- 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
- システムへの遮音壁の実装を行ったことで、その効果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、新幹線など高速列車に対する車両編成や空力音の実装及び橋梁などの各種構造物音の実装が挙げられる。また、本システムのヘッドマウントディスプレイ型の VR 装置への移植について検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 木下公二, 吉町徹, 石田安理, 榎山和男: VR 技術を用いた鉄道騒音評価システムの構築, 第 44 回土木学会関東支部技術研究発表会, I-64, 土木学会, 2017.
- 2) 吉町徹, 榎山和男: 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, pp49-52, 2016.
- 3) Ward, D.B. and Abhayapala, T.D.: Reproduction of a plane-wave sound field using an array of loudspeakers, Speech and Audio Processing, IEEE Transactions on, vol.9 pp.697-707, 2001.
- 4) 木下公二, 吉町徹, 榎山和男: VR 技術を用いた車両編成を考慮した鉄道騒音評価システムの構築, 計算工学講演論文集 Vol.22, B-11-2, 2017.5
- 5) 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 2008", 日本音響学会誌, Vol.65, pp.179-232, 2009.