幾何音響理論を用いた鉄道騒音評価システムとVR 技術を用いた可視化

中央大学大学院	学生員	木下	公二
JSOL	正会員	吉町	徹
中央大学	正会員	樫山	和男
建設環境研究所	正会員	志村	正幸

1. はじめに

鉄道騒音は,心理的不快感や睡眠障害などの悪影響を人体に及ぼす可能性があるため,計画・設計を行う際にその大きさの評価をすることは重要である.鉄道騒音の影響を 事前に予測し対処するために,著者らの既往の研究では 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できる鉄道騒音評価のシステム¹⁾²⁾の構築を行なってきた.

しかし,既往のシステムでは音圧分布の可視化機能を有 していないために観測者が鉄道騒音の空間的広がりを把握 することが困難であった.そこで、本論文では鉄道騒音の空 間分布の把握を容易にするため,VR 装置を用いて音圧レベ ルの等値面を描画することで騒音の可視化を行い,遮音壁 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

(1) VR 環境・システム概要

本論文で用いる没入型 VR 装置 HoloStage 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,また VR 空間内の装置の利用者の 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.

図-1 に本システムの処理工程を示す.その他本システムの詳細に関しては参考文献 1)2) を参照されたい.



図-1 本システムの処理工程

(2) 幾何音響理論による音響計算

本論文では,鉄道走行音の伝搬計算に幾何音響理論に基 づく計算モデル"ASJ RTN-Model 2013"³⁾を使用してお り,走行音を車両前後各2か所の各台車中央にそれぞれ配 置する.観測点における各音源からの音圧レベルは次式(1) で表される.

$$L_A = L_{WA} - 8 - 20 \log_{10} r + \Delta L_{dir} + \Delta L_{dif} \tag{1}$$

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 は台車から観測点の距離である 、 ΔL_{dir} は指向性による補正量 [dB] 、 ΔL_{dif} は回折減衰によ る補正量 [dB] であり詳しくは後述する 、

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(2)で表わされる.

$$L_A = 10 \log_{10} \Sigma(10^{L_{A,i/10}}) \tag{2}$$

ここで, i は合成する音源の数 (音線の数) である.

a) 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 しづら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⁴⁾.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.

$$\Delta L_{dir} = 10 \log_{10} (\cos^n \theta \cdot (0.1 + 0.9 \cos \phi)) \tag{3}$$

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 向性が強くなり、本研究においてはn=1を用いている、 θ





図-4 各要素ごとの等値面の作成

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-2 にその位置関係を示す.

b) 回折減衰による補正

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.

遮音壁などの音響障害物による回折補正量 ΔL_{dif} は,点音源S,回折点O,観測点Pに関する回折経路差 [m]を用いて次式 (4) で計算する.

$$\Delta L_{dif} = \left\{ \begin{array}{ll} -20 - 10 \log 10 (c_{\text{spec}}\delta) & (c_{\text{spec}}\delta \ge 1) \\ -5 - 17.0 \cdot \sinh^{-1} (c_{\text{spec}}\delta)^{0.414} & (0 \le c_{\text{spec}}\delta < 1) \\ \min[0, -5 + 17.0 \cdot \sinh^{-1} (c_{\text{spec}}|\delta|)^{0.414}] & (c_{\text{spec}}\delta < 0) \end{array} \right\} (4)$$

ここで,図-3 に示すように観測点 P から点音源 S が見える 場合には の値を負とする.また, *c*_{spec} は騒音の分類に よって変化する係数であり,min[a,b] は数値 a,b のうち小 さい値を表す.なお,遮音壁の高さは 3m とした.

(3) 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960,000の四面体メッシュデー タ(水平・鉛直・高さ方向各1m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-4).表示したい



図-5 可視化結果

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.

3. 適用例

鉄道騒音の空間分布の把握を容易にするため,VR 装置を 用いて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,遮音壁の有無の比較を通して有効性の検討を行う. 図-5 に可視化結果を示す.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.なお,VR 空間における本シミュレーションで は東北新幹線 E2 系を対象とした.

図-5(a) は 95dB の等値面の内側から観察している様子で あり,音源付近において大きい音圧レベルが生じているこ とが確認できる.また,図-5(b)では遮音壁を回折すること により騒音の伝搬する範囲が変化し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

本論文では鉄道騒音の空間分布の把握を容易にするため, VR 装置を用いて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,遮音壁の有無の比較を通して有効性の 検討を行った.

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.また, 遮音壁を表示させたケースでは遮音壁を回折することによ り騒音の伝搬する範囲が変化している様子が確認できる. 今後は,トンネルなど複雑な周辺環境への適用可能とする 予定である.

参考文献

- 1) 木下公二,吉町徹,石田安理,樫山和男: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,樫山和男: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) 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.
- 4) 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.