

VR技術を用いた道路・鉄道・航空機 騒音シミュレーション

Traffic Noise Simulation for Roads, Railways and Aircraft using VR technology

樺山和男¹⁾

Kazuo Kashiyama

1) 工博 中央大学 理工学部 教授 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27, E-mail: kaz@civil.chuo-u.ac.jp)

This paper presents a noise evaluation system based on VR technology. The geometrical acoustic theory is applied to the traffic noise simulations such as road, railway and aircraft. The system exposes to the users the computed noise level with both the auditory information using so road, railway and aircraft, and source signal and the visual information using CG image. The computed results are compared with the measurement results in VR space. The present system is useful for planning and designing tool for various soundproofing works, and also for consensus building for designers and the local residents.

Key Words : Traffic noise, VR, Geometrical acoustic theory

1. はじめに

交通騒音は、心理的不快感や睡眠障害などの影響を人体に及ぼす可能性があるため、防音対策等の計画・設計を行う際には、その大きさを定量的に評価する必要がある。

著者らは騒音をより直感的に理解・把握することを目的として、バーチャルリアリティ（以下VR）技術を用いた騒音評価システムの構築を行ってきた[1]-[5]。このシステムは、騒音レベルを幾何音響理論に基づくモデルにより計算し、その結果をCGによる立体映像による可視化と立体音響による可聴化の両方を用いてVR空間内の利用者に映像と音を同時にかつリアルタイムに提示するものである。VR技術の適用は、これまで専門家以外は困難であった音圧レベルの差異を理解することが容易になるとともに、実際の音場をVR空間上で疑似的に体験することを可能とする。本システムは、交通施設の計画や設計、防音対策などの音環境の改善、設計者間や住民との合意形成を講じる上で有用なツールとなることが期待される。

本稿では、VR技術を用いた交通騒音評価システムの概要について述べるとともに、実際の道路・鉄道・航空機の騒音問題への適用を通じて、本システムの妥当性と有効性の検証を行った事例を紹介する。

2. 交通騒音評価システム

(1) VR環境

本研究で用いた没入型VR装置Holostageを図-1に示す。この装置は、前面と側面及び底面の3面の大型スクリーン（前面と側面は透過型スクリーン、床面は反射型スクリーン）とそ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。また、天井には7.1チャンネルの音



図-1 没入型VR装置

響機器を備えており、立体音響場を構築することが可能である。

(2) システム概要

本システムのフローチャートを図-2に示す。入力データとしては、自動車、鉄道車両、航空機などの走行条件、音源の音響パワーレベル、構造物や防音壁などの幾何形状を設定する。また、各時間ループ内において、音源位置、VR空間内の利用者（受音点）の位置情報をトラッキング装置より取得する。そして、これらの情報を用いて幾何音響理論に基づくモデル（ASJ RTN-Model 2013:以下ASJモデル）[6]により、VR空間内の利用者位置における騒音レベルを計算する。

可視化部では、3D化した自動車、鉄道車両、航空機および対象地域を各スクリーンに描画する。一方、可聴化部では、音響プログラミングソフトMAXを用いて音響計算と立体音響信号を提示する。なお、可視化と可聴化の情報の共有は、UDP/IP通信により行う。

(3) 騒音の発生源

本システムでは、騒音レベルの時間的変化を算定する

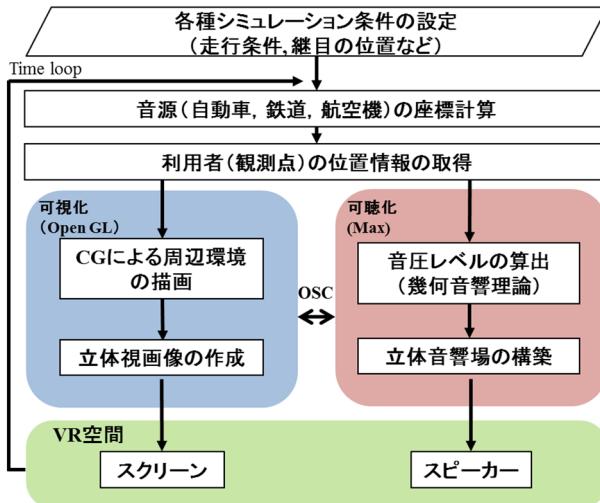


図-2 本システムのフローチャート

ために、幾何音響理論に基づくASJモデルにより、点音源の計算式を使用する。自動車および航空機の音源はエンジン位置に、鉄道車両の音源は台車上に設定した。また、打撃音は線路の継ぎ目に配置し、車軸が通過した瞬間に発生する点音源として扱った[5]。

(4) 音源データの採取と定常音化

VRシステムに可聴化用の音源データを実装するため、実際に走行・飛行している音源データの採取を行った。

定常音化には、設置した騒音計の前面を通過する微小な時間区間のデータを抽出してそれをつなぎ合わせることで作成した。その際、つなぎ目での音の不連続性を取り除くため、位相をずらして合成化するとともに、音源データは距離減衰を含むため、これを取り除く処理を行い音源の定常音の作成を行った[2], [5]。

(5) 幾何音響理論による音響計算

本システムでは、音源を半自由空間における点音源として扱うASJモデル[6]を用いた。

利用者位置の観測点におけるA特性音圧レベルは次式で与えられる。

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

ここで、 L_A は観測点での音圧レベル[dB]、 ΔL_{dir} は音源の音響パワーレベル[dB]、 r は音源から受音点までの距離、 ΔL_{cor} は音源お指向性に関する補正項、 ΔL_{cor} は音源から観測点に至る音の伝播に影響を与える各種の減衰要素に関する補正項である。なお、音響パワーレベルは、実測結果から距離減衰分を加えることで算出して用いた。

また、図-3のように音源が複数存在する場合には、観測点における各音源からの伝搬音の音圧レベルの合成値は次式で表わされる。

$$L_A = 10 \log_{10} \sum (10^{L_{Ai}/10}) \quad (2)$$

ここに、 i は合成する音源の数(音線の数)である。

図-4は鉄道の場合の指向性を示したものであるが、次式を用いている。

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

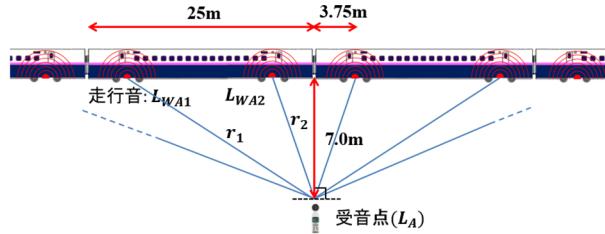


図-3 音源と受音点の位置関係と音の合成

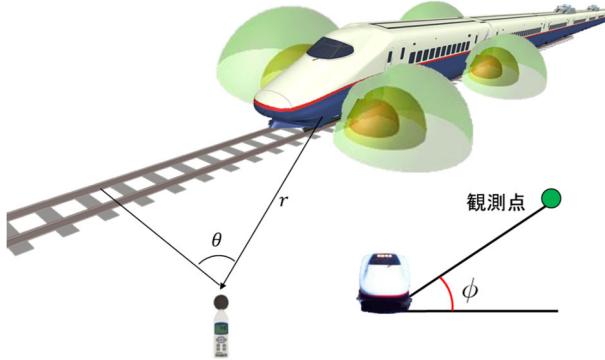


図-4 音源の指向性

ここに、 n は指向性に関するパラメータ、 θ は観測点から見た走行ラインへの最短地点を起点とした水平角である。

(6) MAXを用いたVR装置の音響制御

本システムでは、Maxを用いて立体音響場の構築を行っている。交通騒音の可聴化は、音圧レベルの計算結果を用いてMaxによるスピーカ制御により行われる。再生する音量は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、その値に基づいてスピーカの音量及び立体音響を制御している。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[7]を用いている。

3. 適用例

(1) 道路交通騒音への適用

道路交通騒音システムの妥当性を検証するため、図-5に示す様々な車種が走行する道路交通シミュレーションに適用した[3]。走行条件として、車間間隔は図に示す通りであり、走行速度：100km/h、路面：排水性舗装、舗装経過年数：0年とした。なお、可聴化に際しては、システム利用者の位置(図中の丸印：高さ1.5m)において計算結果とVR空間内で再生される騒音の音圧レベルが一致する必要がある。そのため、事前に試験データを用いてVR空間内での観測位置で騒音を測定してキャリブレーションを行った上で実施した。図-6に高さ3mの遮音壁がある場合とない場合の観測位置での計算結果とVR空間内での計測結果の比較を示す。図より、遮音壁の効果によりピーク値で20dB程度騒音が低減されていることが分かる。また、VR空間内での計測結果は計算結果と良い一致を示しており、VR空間内では計算結果通りの音場が再現されていることが分かる。

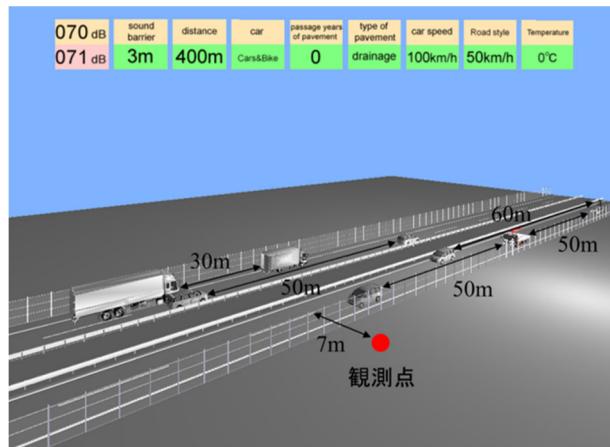


図-5 道路騒音の適用例

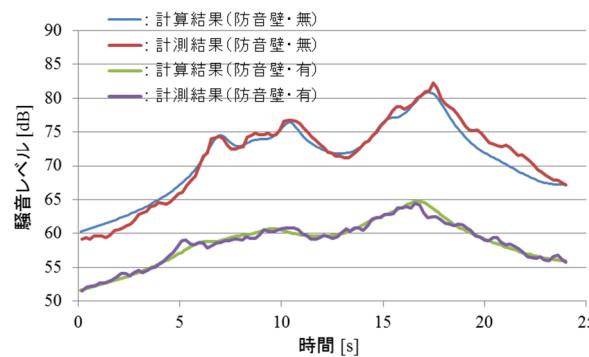


図-6 計算結果とVR空間内での測定結果の比較

(2) 航空機騒音への適用

航空機騒音システムの妥当性の検証を行うため、東京国際空港（羽田空港）を適用対象とした。

適用例として、羽田空港のC滑走路から離陸する航空機（Boeing737-8）を対象として、離陸方向の対岸にある城南島海浜公園での実測結果と計算結果との比較を行った。図-7にVR空間内で騒音を体験している様子を示す。飛行経路については28機分の飛行経路の平均をとったものを用い、指向性モデルには90度ダイポールモデルを使用した[4]。図-8に、実測結果と計算結果の音圧レベルの比較を示す。図中のスラントディスタンスは航空機から観測点までの距離である。図より、指向性を考慮することにより騒音のピークの発生時刻が実測結果と良い一致を示していることが分かる。ただし、ピーク後の音圧レベルについては大きな差異があり、より適切な指向性のモデルの導入の検討が必要といえる。

次に、防音対策の評価を行うために観測者が屋内にいる場合を想定してシミュレーションを行った。なお、屋内シミュレーションに使用した建物モデルは、奥行3.6m、横3.6m、高さ3mの直方体とし、壁面の材質はコンクリートと仮定し、窓は一重窓と二重窓について検討した。図-9に、システム利用者がVR空間内で騒音を体験している様子を示す。また、図-10にVR空間内での測定結果との比較を示す。図より、暗騒音（約48dB）以上では計算結果どおりの音場がVR空間内ではほぼ再現できていることがわかる。



図-7 航空機騒音を体験している様子

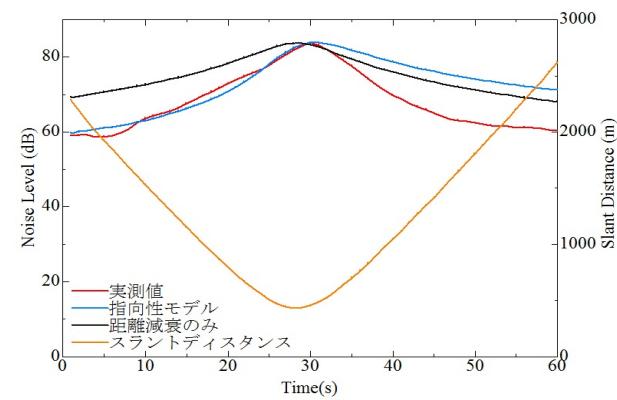


図-8 計算結果と実測結果との比較



図-9 室内にて航空機騒音を体験している様子

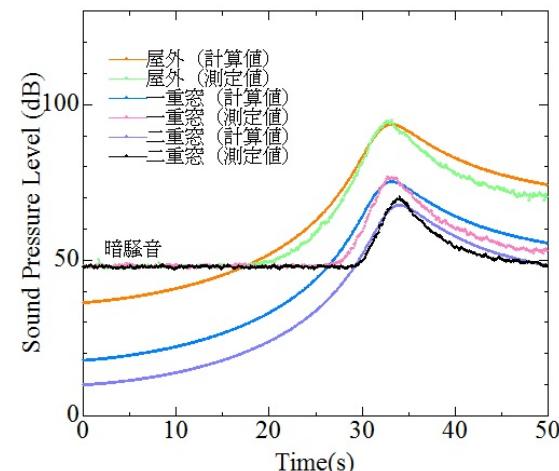


図-10 計算結果とVR空間内での測定結果の比較

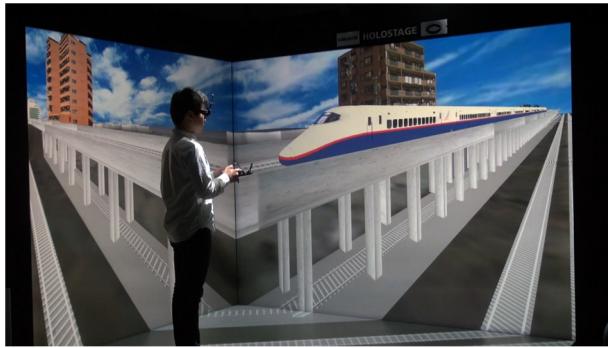


図-11 鉄道騒音を体験している様子

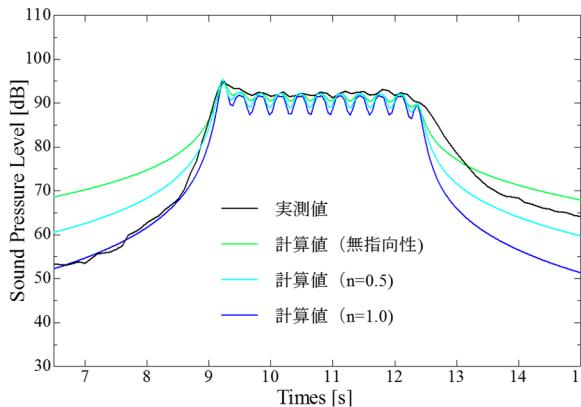


図-12 計算結果と実測結果との比較

(3) 鉄道騒音への適用

本鉄道騒音システムの適用事例として、栃木県小山駅周辺の東北新幹線の騒音を対象にした。図-11にシステムを体験している様子を示す。CADモデルの作成は、国土地理院発行の地形データ及び建物データ、線路の軌道データ等を用いて行った。また、使用した指向性モデル及び計算条件等は文献[5]に詳しい。

図-12にE2系の走行音の実測値と本手法の計算結果の比較を示す。この時の列車の走行速度は274km/h、観測点は軌道中心から7mの地点で実施した(図-3参照)。図中、nは指向性に関する係数であり、図より、列車接近時には指向性係数n=1.0の場合の計算結果と実測値が良い一致を示していることがわかる。しかし、新幹線通過後の実測値の音圧レベルは接近時よりも大きくなっている、指向性が異なることがわかる。この点については、今後の課題したい。

なお、現在、図-13に示すように、本システムを磁気浮上式の高速鉄道に適用する検討を行っている。結果については、講演時に示す。

4. おわりに

本論文では、VR技術を用いた可視化・可聴化に基づく交通騒音評価システムの概要について述べるとともに、道路、鉄道及び航空機騒音への適用性の検証を行った事例を紹介した。

本システムは、幾何音響理論に基づいて各種交通騒音

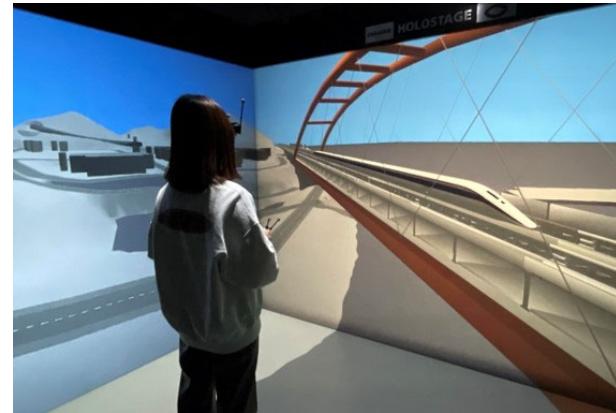


図-13 磁気浮上式高速鉄道の騒音を体験している様子

をリアルタイムに計算及び可聴化してVR空間に提示することが可能であり、本システムにより、音源データの異なる様々な交通騒音に適用可能なため、新規の交通施設や防音対策工の計画・設計段階において有効に用いることが可能である。また、周辺住民との合意形成を得る上で有効な手段となることが期待できる。

今後は、システムの高精度化に向けて、音源の指向性や各種補正項等について検討する予定である。

謝辞：本システムの構築において建設環境研究所の志村正幸氏および清水建設の谷川将規氏より多大なるご支援とご協力を得た。ここに、記して感謝いたします。

参考文献

- [1] 田近伸二、樋山和男、志村正幸：VR技術を用いた対話型道路交通騒音評価システムの構築、応用力学論文集、土木学会、Vol.13, pp.231-240, 2010.
- [2] 江嶋孝、樋山和男、守屋陽平、志村正孝、谷川将規：実車走行音を用いた道路交通騒音評価システムの構築、土木学会論文集A2(応用力学)、Vol.69, No.2, pp.155-162, 2013.
- [3] 谷川将規、江嶋孝、樋山和男、志村正幸：混合交通を考慮したVR技術に基づく道路交通騒音評価システムの構築、土木学会論文集A2(応用力学)、Vol.70, No.2., pp.I_195-I_202, 2015.
- [4] 石田安理、山本恭平、吉町徹、樋山和男、志村正幸：VR技術を用いた体験型航空機騒音評価システムの構築、土木学会論文集F3(土木情報学)、Vol.72, No.2, pp.I_145-I_147, 2016,
- [5] 木下公二、吉町徹、樋山和男、志村正孝：VR技術を用いた鉄道騒音評価システムに関する研究、土木学会論文集F3(土木情報学)、vol.73, no.2, pp.I_372-I_379 2017.
- [6] 日本国際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..
- [7] 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, pp.697-707, 2001.