可視化・可聴化技術を用いた体験型交通騒音評価システム*

樫山 和男**

An Experimental-base Traffic Noise Evaluation System Using Visualization and Auralization Technology

Kazuo KASHIYAMA

1. 緒 論

道路や鉄道、航空機などの交通騒音は心疾患を含む様々な健康に悪影響を及ぼすことが明らかになっており、幹線道路や鉄道の沿線、空港周辺では大きな社会問題の一つとなっている。近年のコンピュータ性能の飛躍的向上により、騒音の評価手法として数値シミュレーション手法は数多く提案及び適用がなされている。数値シミュレーション手法は、幾何音響理論と波動音響理論に基づく方法に大別されるが^{1), 2)}、いずれの手法においても計算結果の評価を行うための後処理手法としては、計算された音圧レベルを等値面等により表示する可視化が一般に用いられている。可視化は、騒音レベルの大きさや分布を知る上で有効な手法であるが、一方で対象地点での騒音の大きさやその時間的变化、防音対策による音圧レベルの差異を直感的に理解・把握することは困難である。

そこで、著者らは騒音をより直観的に理解・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³⁾⁻⁸⁾。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リアルタイムに利用者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には困難であった音圧レベルの理解を容易にするとともに、実際の音場を疑似的に体験することを可能にし、新規の計画や設計、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などを講じる上で有用なツールとなることが期待されている。

本稿では、VR 技術を用いた可視化・可聴化技術に基づく騒音評価システムの概要について述べるとともに、それを道路、鉄道、航空機などの各種交通騒音シミュレーションに適用し、本手法の妥当性と有効性の検証を行った事例を紹介する。

2. VR 環境と騒音評価システム概要

2.1 VR 環境

本研究で用いた VR 装置を Fig. 1 に示す。VR 装置は、中央大学所有の HoloStage であり、3 面の大型スクリーンとそれぞれのスクリーンに対応する 3 台の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光学式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る。VR 装置のコンピュータは Master-PC と 4 台の Slave-PC（3 台がプロジェクター用：HP Z620, 64GB, Nvidia Quadro K5000, 1 台がトラッキング用：HP Z210, 4GB）から構成される Cluster システムである。トラッキング用 PC は、眼鏡及びコントローラに付属しているマーカーの位置を逐次捕捉しており、VR 空間内の対話性を実現している。残りの 3 台の PC は、プロジェクターと接続されており、各スクリーンが担当する領域の映像を作成・投影する。また、聴覚情報を提示するための 7.1 チャンネルの音響機器を備えている。

2.2 システム概要

本システムは、各種交通騒音を直感的に評価・把握することを目的として、騒音の可聴化機能と可視化機能を有する。Fig. 2 に道路騒音を例に本システムの機能を示す。可聴化機能とは、騒音伝播解析結果を実際の車や列車の走行音、航空機の離陸音を用いて可聴化し、VR 空

Fig. 1 CAVE (HoloStage).

* 原稿受付 2017 年 5 月 1 日

** 正会員 中央大学 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)

間において立体 CG 表示される車両や飛行する航空機に実装して、聴覚情報として利用者に提示する機能である。一方、可視化機能とは、音圧分布の空間的な広がりを正確に把握するために、音圧レベルの等値面を立体 CG で提示する機能である。

計算条件については、以下の設定が可能となっている。

- ・利用者は VR 空間内を自由に移動して騒音シミュレーション結果を確認することができる (Fig. 2 (a)).
- ・走行条件として走行速度と走行距離を任意に設定できる (Fig. 2 (b)).
- ・交通施設環境として、防音壁、高架橋、建物、盛土、切土、トンネルの選択が可能である (Fig. 2 (c), Fig. 3). また、舗装の種類 (排水性舗装, 密粒性舗装) と舗装後の経過年数 (0 ~ 15 年) を設定できる。
- ・自動車の車種 (普通車, 小型貨物車, 中型車, 大型車, バイク) を任意に組み合わせて設定できる (Fig. 2 (d)).

なお、周辺環境や車種及び走行条件の変更は、VR 空間内においてコントローラ操作により対話的に変更することが可能である。

本システムのフローチャートを Fig. 4 に示す。入力データとしては、自動車や鉄道車両、航空機の走行条件、構造物等の幾何情報、音源の音響パワーレベル等を入力し、各時間ループ内において、走行速度に基づく音源の座標位置、VR 空間内のシステム利用者 (受音点) の座標位置を取得する。そして、それらの情報を用いて幾何音響理論に基づくモデル (日本音響学会の道路交通騒音予測モデル ASJ RTN-Model 2013²⁾: 以下 ASJ モデルと記す) により利用者位置における騒音レベルを計算す

Fig. 2 Characteristics of the present system.

Fig. 3 Road environments.

Fig. 4 Flow chart.

る。このモデルは、音波の波動性は考慮せず、距離減衰や反射、回折等におけるエネルギー収支のみを扱う簡易な計算法である。可聴化部は、音響プログラミングソフト Max⁹⁾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¹⁰⁾を用いている。一方、可視化部は、CAVE ライブラリと OpenGL を用いた C++ によるプログラムにより、自動車や鉄道車両及びその周辺環境の立体 CG を各スクリーンに描画する。なお、可視化と可聴化の情報の共有は、OSC (Open Sound Control) プロトコルを用いた UDP/IP 通信により行う。

2.3 騒音シミュレーション

騒音シミュレーションには、幾何音響理論に基づく ASJ モデルを用いた。いま、Fig. 5 に示す自動車による騒音伝播を考えると、観測点における A 特性音圧レベル L_A は次式で与えられる。

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

ここに、 L_{WA} は音源の A 特性音響パワーレベル、 r は音源から観測点までの直達距離、 Δ_{cor} は回折、反射などの各種の減衰に関する補正項を表す。Fig. 5 の場合には、一つの音源から生じる 2 つの音の伝播を考える必要があり、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。

$$L_A = 10 \log_{10} \sum_{i=1}^n (10^{L_{A,i}/10} / n) \quad (2)$$

ここに、 n は音の伝播経路の数である。

自動車の騒音の音源は、主としてエンジン系騒音とタイヤ/路面騒音に大別される。加速走行騒音の場合にはエンジン系騒音の寄与が高いが、定常走行騒音の場合にはタイヤ/路面騒音の寄与が高くなる。ASJ モデルでは、実用性を考慮してそれらを総合して一つの点音源として扱っており、本システムでは、音源を自動車のエンジン部に設定した。

一方、鉄道の騒音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（上記の 3 つをまとめて以下走行音とする）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）に分けられるが、本研究では、Fig. 6 に示すように走行音の音源は台車上に設定し、車両と共に移動する点音源として扱う。また、打撃音は線路の継ぎ目上に配置し、車両モデルの車軸が通過した瞬間に発生する点音源として扱う⁷⁾。

また、航空機においてはエンジン前のファンのタービン音とジェットエンジンの噴射音に大別されるが、それらを総合した点音源をエンジン部に設定した⁸⁾。

Fig. 5 Geometrical acoustic theory.

Fig. 6 Position of sound source.

なお、鉄道及び航空機については音源の指向性が顕著なため、指向性の考慮が重要となる。指向性モデルの詳細は、文献 7)、8) を参照されたい。

2.4 走行音データの採取と定常音化

VR 装置に可聴化用の音源データを実装するため、実際に走行している音源データの採取を行った。自動車については、国土技術政策総合研究所（茨城県つくば市）の試験走路において、種々の自動車の速度別の走行試験を実施し、その際に発生する自動車走行音を採取した。また、鉄道については、走行音の採取はレールの継ぎ目が無い地点で、打撃音は継ぎ目付近で採取した。採取した音源データは距離減衰を含むため、これを取り除くための処理を行い定常音の作成を行った⁴⁾。なお、航空機騒音の音源データについては、Web より取得した。

2.5 Max を用いた音響制御

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。Fig. 7 は、鉄道騒音に対する Max のモジュールである⁷⁾。走行音は、Fig. 7 中の「groove~」オブジェクトを用いて作成した定常音を繰り返し再生する。再生する音量は C++ で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。一方、打撃音については、車軸が継ぎ目を通過した際に信号を Max に送り、その瞬間に Fig. 7 中の「play~」オブジェクトを用いて打撃音を一度だけ再生する。なお、立体音響場の構築には、球面調和関数

Fig. 7 Sound control by Max.

展開手法に基づく Ambisonics¹⁰⁾を用いている。

3. 適用例

3.1 道路交通騒音への適用

本道路交通騒音システムの妥当性を検証するため、Fig. 8 に示すような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⁶⁾。走行条件は、車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（Fig. 9 参照）での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。Fig.10 に遮音壁がない場合とある場合（高さ3m）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空間内でほぼ計算結果通りの音場が再現されていることが分かる。なお、文献11)に本シミュレーションの動画を掲載している。

Fig.11 は、様々な道路環境（Case1：平面道路の場合、Case2：掘割道路の場合、Case3：高架下道路の場合、Case4：建物が隣接している場合）を仮定して、一台の自動車を走行させた際の音圧レベルの等値面（50dB, 55db, 60db）を可視化している様子である。本システ

Fig. 8 Application to road traffic noise.

Fig. 9 Observation in VR space.

Fig.10 Comparison of numerical results.

Fig.11 Visualization functions.

ムの可視化機能を用いることにより、システム利用者は音圧レベルの空間分布を立体視により定量的に把握することが可能である。

3.2 鉄道騒音への適用

本鉄道騒音システムの妥当性の適用事例として、栃木県小山駅周辺の新幹線騒音を対象にした⁷⁾。Fig.12 に対象地域のCADモデルを示す。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。

Fig.12 CAD model for Oyama station.

適用例として小山駅を通過する上り新幹線（E2系）の走行シミュレーションを対象とした。実測は小山駅新幹線ホームの北側端部にて、軌道の中心から10mの地点に騒音計を設置して行った。なお、新幹線の通過速度は232kmであった。本手法によるシミュレーションは走行速度、音源位置、観測点を実際の条件と同様に設定して行い、走行音の音響パワーレベルは、実測データを用いて式(1)より逆算して与えた。また、使用した指向性モデル及び計算条件等は、文献7)に詳しい。

Fig.13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。図中、 $\cos$ にかかる指数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 $n=1.5$ 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おり、 $n=1.5$ の場合の計算結果とは大きく異なっていることが分かる。これは、新幹線が駅構内に侵入したことにより発生する構造物からの反射音による影響と考えられ、この点については、今後の課題としたい。また、Fig.14は本手法による計算値（ $n=1.5$ の場合）とVR装置内での計測結果の比較を示す。図より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。また、Fig.15は、システム利用

Fig.13 Comparison with observed results.

Fig.14 Comparison with observed results in VR space.

Fig.15 Application to high speed train.

者が遮音壁を設置した場合の騒音の低減効果を確認している様子である。なお、この例では実際には東北新幹線を走行しないN700系を用いている。本システムにより、防音対策の効果をリアルタイムに確認することができる。他、音源データの異なる様々な車両に適用可能なため、防音対策工や新線の計画・設計段階において有効に用いることが可能である。なお、文献11)に本シミュレーションの動画を掲載している。

3.3 航空機騒音への適用

本航空機騒音システムの妥当性の検証を行うため、Fig.16に示す東京国際空港（羽田空港）を適用対象とした。

適用例1として、Fig.16に示すようにC滑走路から離陸する航空機（Boeing737-8）を対象として、城南島海浜公園（観測地点は丸印）での観測結果と計算結果との比較を行った。飛行経路については10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。指向性モデル及び計算条件等の詳細は文献8)に詳しい。Fig.17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、ピーク前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、適用例2として、Fig.16に示すようにB滑走

Fig.16 Application example for Haneda airport.

Fig.17 Comparison with observed results.

路を離陸する航空機騒音を例に、観測者が屋外にいる場合と屋内にいる場合（観測地点は丸印）を想定してシミュレーションを行った。また、VR空間において立体音響場を再現して騒音測定を行い、計算結果どおりの音場が再現できているか否かの検証を行った。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。Fig.18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、Fig.19にVR空間内での測定

Fig.18 Application to aircraft noise.

Fig.19 Comparison with observed results in VR space.

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ほぼ再現できていることがわかる。なお、文献11)に本シミュレーションの動画を掲載している。

4. 結論

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、新設の道路、鉄道、空港及び騒音対策工の計画・設計支援ツールとして、また周辺住民との合意形成を得る上でも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、音源の指向性や減衰に関する補正項等について検討する予定である。

参考文献

- 1) 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）
- 2) 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（2014），pp.172-230.
- 3) 田近伸二，樫山和男，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（2010），pp.231-240.
- 4) 江嶋孝，樫山和男，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（2013），pp.155-162.
- 5) 谷川将規，江嶋孝，樫山和男，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）特集号Vol.70，No.2（2015），pp.I_195-I_202.
- 6) Kashiya, K., Ejima, K., Yoshimachi, T., Ishida, A., Tanigawa, M. and Shimura, M., A road traffic noise evaluation system using virtual reality, Proc. Proc. of the 15th Int. Conf. on Construction Applications of Virtual Reality, Banff（2015），Paper No.81.
- 7) 吉町徹，浦野宏太，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論文集，土木学会（2016），pp.49-52.
- 8) 石田安理，山本恭平，吉町徹，樫山和男，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）特集号，Vol.72，No.2（2016），pp.I_145-I_147.
- 9) ノイマンピアノ編（赤松正行，左近田展康共著）：2061：Maxオデッセイ，リットーミュージック（2006）.
- 10) 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,（2001），pp.697-707.
- 11) <http://www.civil.chuo-u.ac.jp/lab/keisan/onbakaiseiki.html>