

## (41) 実車走行音を用いたVR技術に基づく 道路交通騒音評価システム

江嶋 孝<sup>1</sup>・谷川 将規<sup>2</sup>・檜山 和男<sup>3</sup>・志村 正幸<sup>4</sup>・上明戸 昇<sup>5</sup>

<sup>1</sup>学生会員 学士 中央大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)  
E-mail: ejima@civil.chuo-u.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 工博 清水建設株式会社 技術研究所総合解析技術センター (〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17)

<sup>3</sup>正会員 工博 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)

<sup>4</sup>正会員 工博 株式会社建設環境研究所 技術本部 (〒170-0013 東京都豊島区東池袋 2-23-2)

<sup>5</sup>正会員 工博 株式会社建設環境研究所 道路環境部 (〒170-0013 東京都豊島区東池袋 2-23-2)

本論文では、幾何音響理論を用いたVR技術に基づく道路交通騒音シミュレーションの臨場感を向上させるため、実際の自動車走行時の周辺の音環境をVR空間内で再現する可聴化システムの構築を行った。国土技術政策総合研究所内の試験走路における走行試験により車種・速度別に走行音を収録し、それらから距離減衰の影響を取り除く等して、道路交騒音の可聴化用音源データの作成を行った。作成した可聴化用音源データの妥当性を図るため、収録した走行音データと音響パワースペクトルの比較を行うことで検証を行った。また、車種・速度別に作成された可聴化用音源データを複数車種が同時に走行する混合交通シミュレーションへの適用を行った。

**Key Words :** *geometric acoustic theory, road traffic noise, spatialization of sound, virtual reality*

### 1. はじめに

道路交通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り、今日では社会問題として重要視されている。近年のコンピュータの性能向上に伴い、道路や防音壁の計画・設計には数値シミュレーション<sup>1)2)</sup>が数多くなされ、幾何音響理論と波動音響理論が用いられている。また騒音レベルの分布などの数値シミュレーション結果の評価には、CG(コンピュータグラフィックス)による可視化が有効に用いられている。CGによる可視化は騒音の影響範囲等の把握を容易にするという長所を有するが、これに加えて聴覚情報として騒音そのものを提示することによって、道路交通に関わる音環境をより直観的に評価・把握することが可能となる。

VR(バーチャルリアリティ)空間内にCG映像(視覚情報)と音(聴覚情報)の双方を用いて道路交通を再現することは、道路計画や騒音対策立案・設計支援ツールとして有効であり、さらに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。

この点に着目して、著者らはこれまでにVR技術を用いた幾何音響理論に基づく道路交通騒音評価システム<sup>3)</sup>

の構築を行ってきた。このシステムは、VR(バーチャルリアリティ)空間内にCG映像(視覚情報)と音(聴覚情報)の双方を用いて道路交通を再現するシステムである。幾何音響理論としては、日本音響学会の道路交通騒音予測モデルASJ RTN-Model 2008<sup>2)</sup>(以下ASJモデルと記す)に基づいた音響計算手法を採用し、種々の騒音源、距離減衰、防音壁などによる回折・反射、地表面による吸音効果等を考慮することができ、多様な音場再現に適用してきた。しかしながら、可聴化に用いていた音源データは車種および走行速度に関わらず、同一の音源データを用いていたため現実感に欠けていた。再現する音環境をより現実感・臨場感のあるものとするためには、実際の自動車走行音に近い音を再現する必要がある。そのためには、交通騒音の実測データから何らかの方法でVR用の音源データを作成する必要がある。

そこで本論文では、国土技術政策総合研究所試験走路において車種・速度別の自動車走行試験を実施し、種々の実際の走行音を収録して、それらを用いて可聴化用の音源データを作成した。また、作成した音源データを様々な車種による混合交通シミュレーションに適用することで現実感・臨場感の向上を図った。



図-1 没入型VR装置

## 2. 道路交通騒音評価システム

本研究で用いた図-1に示すVR装置は、中央大学にあるHoloStage(CHRISTIE社)であり、3面の大型スクリーンおよび7.1chのスピーカから構成される。本システムは、道路交通騒音を正確かつ直感的に評価・把握でき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。可聴化機能とは、騒音源となる自動車や道路の周辺環境を立体CGで再現するとともに、騒音伝播解析結果を自動車の走行音を用いて可聴化し、聴覚情報として利用者に提示する機能である。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。また、利用者はコントローラの操作により、VR空間内では以下に示すような対話的処理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道路交通騒音シミュレーション結果の可聴化および可視化を行うことができる。
- 道路周辺環境として、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。また、道路の舗装の種類(排水性舗装、密粒性舗装)と舗装後の経過年数を設定できる。
- 車種(普通車、小型貨物車、中型車、大型車、バイク)を設定できる。
- 自動車の走行速度、走行距離などの走行条件を設定できる。

なお、道路環境や車種および走行条件の変更は、VR空間内において図-2に示すようなインターフェイス画面を表示し、コントローラの操作により条件を変更することが可能である。また本システムでは、VRプログラミング言語であるCAVELib (SGI社)とOpenGLによる独自開発したプログラムによりVR空間を構築し、交通騒音の可聴化にはMAX<sup>4)</sup> (Cycling'74社)を用いている。

## 3. 音源データの作成と実装

### (1) 走行音データの収録試験

VR空間内で直感的に道路交通騒音の評価を行うためには、実際の自動車走行音に基づく現実感のある音源データを用いる必要がある。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、種々の自動車を所定速度で走行させる走行試験を実施し、その際に発生する自動車走行音を実測した。図-3には試験に用いた車種を示す。

収録した走行音データは、図-4に示すように自動車が一定速度(50, 60, 70, 80, 90, 100 km/hの6条件)で遠方より到来し、測定点前を通過して十分な距離が離れるまでの間(約15秒間)の走行音であり、普通騒音計で測定(A特性補正および補正なし)し、その出力をデータレコーダに記録した。このときのサンプリング周波数は20kHzである。なお、測定点は周辺建物からの反射音の影響を極力さけた場所に設定している。

項目	条件選択					
	0m	1m	2m	3m	4m	5m
防音壁	0m	1m	2m	3m	4m	5m
走行距離	100m	200m	400m	800m		
車種	普通車	小型貨物車	中型車	大型車	バイク	
舗装年数	0年	5年	10年	15年		
舗装	排水性舗装	密粒性舗装				
走行速度	50km/h	60km/h	70km/h	80km/h	90km/h	100km/h

図-2 走行条件設定画面



図-3 使用車種

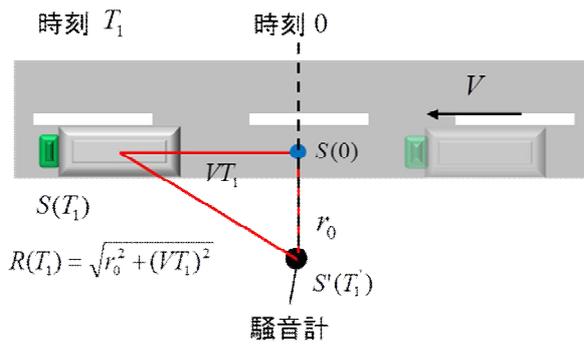


図4 自動車走行音測定の概要

図5 (a)に収録した走行音の波形の一例(普通車, 走行速度90km/h)を示す. 横軸は時間, 縦軸は収録音の最大音圧を1とした相対音圧である. 図より明かなように走行音は距離減衰の影響を受け, 測定点から自動車が進んでいくほど音圧は小さい.

## (2) 可聴化用音源データの作成<sup>9)</sup>

自動車走行音の実測データから可聴化用の音源データを生成するには, 距離減衰の影響を取り除く必要がある. 図4に示すように, 走行ラインから距離  $r_0$  にある観測点を設定する. 自動車は一定速度  $V$  で走行するとし, 時刻  $T_1$  での走行音の瞬時音圧を  $S(T_1)$  とする. この発生音が時刻  $T_1' (> T_1)$  に観測点に達したとき観測点における音圧  $S'(T_1')$  は, 距離減衰を考慮して次式で表される.

$$S'(T_1') = \frac{1}{R(T_1)} \cdot S(T_1) + \alpha \quad (1)$$

ただし,  $R(T_1) = \sqrt{r_0^2 + (VT_1)^2}$  は時刻  $T_1$  における音源・観測点間水平距離であり,  $\alpha$  は周辺からの反射音や暗騒音の影響を表す. 測定誤差やノイズを完全に排除することは不可能であるため, 以下では  $\alpha = 0$  として扱う.

一方, 時刻  $T_1'$  は次式で表される.

$$T_1' = T_1 + \frac{R(T_1)}{c_0} \quad (2)$$

ただし,  $c_0$  は音速である. 式 (1), 式 (2) から次式を得る.

$$T_1 = \frac{2T_1' + \sqrt{4T_1'^2 - 4(1 - M_0^2)(T_1'^2 - Q_0^2)}}{2(1 - M_0^2)} = F(T_1') \quad (3)$$

ここに, 式中の変数は  $M_0 = V/c_0$ ,  $Q_0 = r_0/c_0$  である. したがって,  $S(T_1)$  は  $T_1'$  の関数として次式で表される.

$$S(F(T_1')) = \beta(T_1') S'(T_1') \quad (4)$$

ここで,  $\beta(T_1') = R'(F(T_1'))$  である. 図5 (b)は式 (4)を用いて図5 (a)の波形から求めた可聴化用音源データであ

る. 図より, 距離減衰の影響はほぼ取り除かれていることが分かる. しかし, この音源データを実際に聞いて確認したところ, 時間とともにうねりが生じたり, 音色が変化するなどの問題があった. これはノイズの影響や音源の指向性等を考慮していないことが原因であると考えられる. そこで, 時間を前後反転した走行音データを元データに重ね合わせることで, 音色の変化を打ち消し, 聴覚上生じる違和感の緩和を図っている. 図6は1000Hzでの値を0dBとした加工前後の走行音の音響パワースペクトルの比較である. 図より, 両者のパワースペクトルはほぼ一致していることが分かる. また図7には, 各車種(速度100km/h)で収録した走行音データ同士でパワースペクトルを比較したものである. 図より, 車種ごとに音圧レベルの卓越している周波数が異なることが確認できる. また, 大型トラック(10t車)および大型バイクの音源は, 他と比較して低めの周波数の音が卓越している.

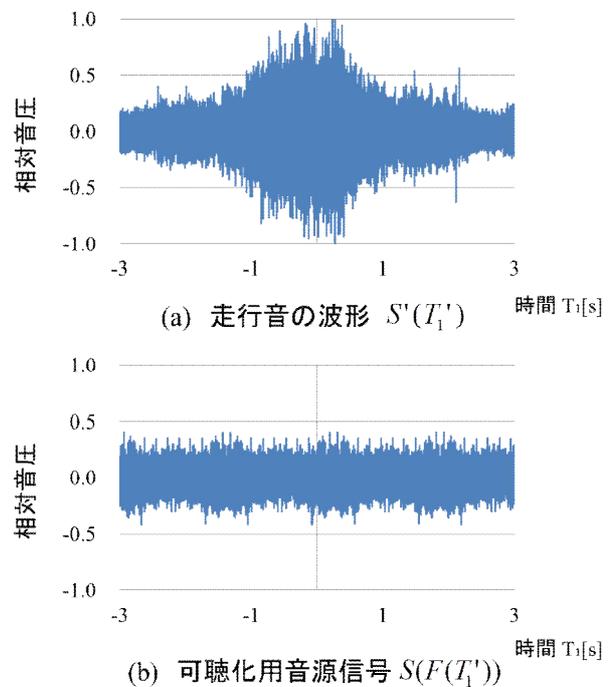


図5 可聴化用音源データの作成

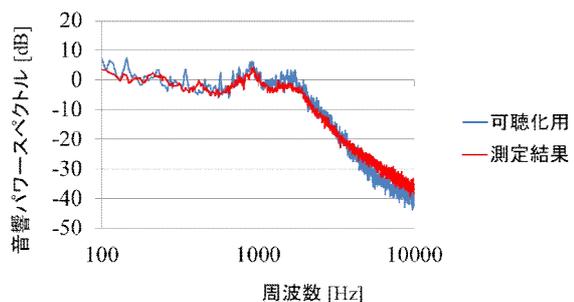


図6 音響パワースペクトルの比較

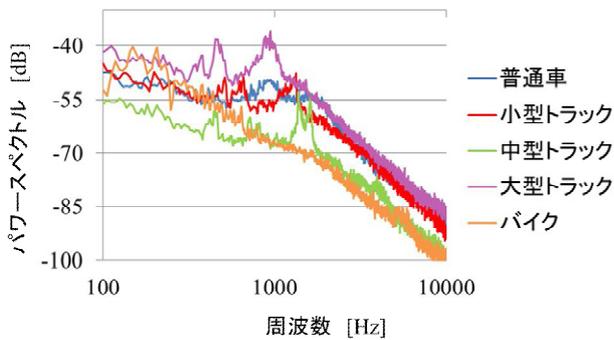


図-7 測定した走行音データによるスペクトル比較

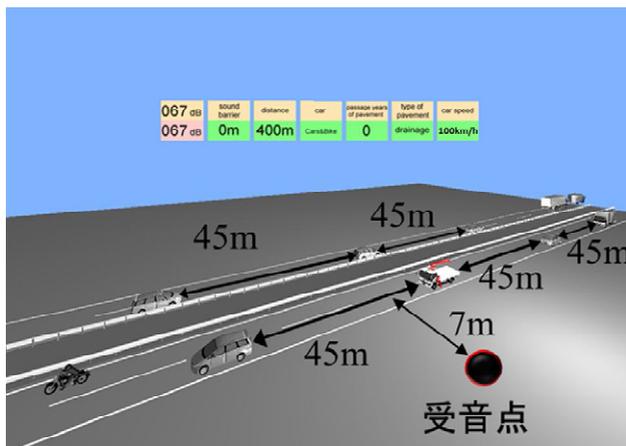


図-8 混合交通シミュレーション例

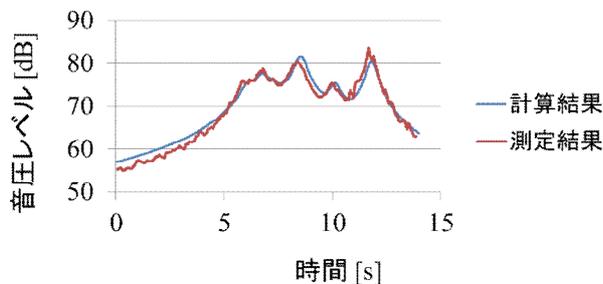


図-9 計算結果と実測結果の比較

#### 4. 適用例

本論文では、前節で示した方法により作成した、車種・速度別の可聴化用音源データを用いて、様々な車種が含まれる混合交通シミュレーションに適用した。また、本システムでは、作成した可聴化用音源データを用いてVR空間内において立体音響場<sup>9)</sup>を構築している。立体音響とは、観測者と音源の位置関係や到来方向、拡がり方を考慮して3次元的な音環境を再現することを指し、スピ

ーカからの出力を制御するために、球面調和解析に基づくAmbisonicsという手法を用いている。図-8に走行条件を示す。走行速度は100km/hとし、路面は排水性舗装(経過年数0年)とした。図-9に音圧レベルの計算結果と騒音計による測定結果の比較を示す。図より、両者はほぼ一致していることが確認できる。

#### 5. おわりに

本論文では、道路交通騒音評価システムの現実感の

向上を目的とし、実際の自動車走行音から可聴化用の音源データを作成し、混合交通シミュレーションに適用することで、以下の結論を得た。

- 可聴化用音源データは、実車走行音とほぼ同じパワースペクトルであることが確認できた。
- 作成した音源データを混合交通シミュレーションに適用したことで、より臨場感の高いシミュレーションを実現した。

今後は、より現実感のあるシミュレーションを行うために、同時に走行させる自動車の台数を増やすとともに、複雑形状の構造物による回折や多重反射を含む複雑な音場にも対応するシステムの構築を目指す。

謝辞：自動車走行音データ取得に関して、試験走路を使用させていただいた国土交通省国土技術政策総合研究所およびご助言いただいた同道路環境研究室土肥学主任研究官、吉永浩志主任研究官に感謝の意を表します。

#### 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ー波動音響解析の技法と応用一、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 2008", 日本音響学会誌, Vol.65, pp.179-232, 2009。
- 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, pp.231-240, 2010。
- 4) 谷川将規則, 守屋陽平, 江嶋孝, 樫山和男, 志村正幸：VR技術を利用した道路交通騒音評価システムの立体音響化と現実感向上に関する研究, 土木学会論文集A2特集号, Vol.16, 2013。(印刷中)
- 5) 谷川将規, 柴田啓輔, 樫山和男：VR技術を利用した道路交通騒音シミュレーションの立体音響化に関する基礎的研究, 土木情報利用技術講演集, Vol.36, pp.29-32, 2011。
- 6) 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。