

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

Development of an Interactive Road Traffic Noise Estimation System Using VR Technology

田近伸二*・檜山和男**・志村正幸***

Shinji TAJIKA, Kazuo KASHIYAMA and Masayuki SHIMURA

*学生会員 工修 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)

**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)

***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)

This paper presents an interactive road traffic noise estimation system using virtual reality (VR) technology. This system exposes an observer the road traffic noise by the both acoustic and visual information. The road traffic noise is computed based on the geometric acoustics theory. The immersive projection technology (IPT) is employed in order to create VR space, and the CG animation is created by OpenGL and CAVE library. The road environment and the vehicle conditions are changed in VR space by using the controller interactively and the real time computing is realized. The acoustic information created by the present system is calibrated to correspond with the acoustic information measured by the sound level meter. The present system is shown to be a useful tool to predict the road traffic noise in planning and designing stage of road.

Key Words : road traffic noise, geometric acoustic theory, virtual reality technology, real time simulation

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るため、道路や遮音壁の設計を行う際にその影響について検討する必要がある。これらの検討には、コンピュータのハードウェアの進歩により、近年、波動音響理論や幾何音響理論に基づく数値シミュレーション¹⁾²⁾³⁾が有効に用いられるようになってきている。しかし従来のシミュレーションでは、得られた音圧レベルはCG(コンピュータグラフィックス)を用いて可視化されるのが一般的である。CGによる可視化は騒音の影響範囲の把握を容易にするという長所を有するが、実際に人間が耳にする聴覚情報の提示が行われないため、騒音の大きさを直観的に理解・把握することは困難である。観察者がその場所で聞く音を、移動する自動車のCG映像(視覚情報)と共に音(聴覚情報)を用いて再現できれば、騒音のVR(バーチャルリアリティ)体験が可能となり、計画・設計支援ツールとして有効であるばかりでなく、住民との合意形成を得る上でも有効となることが期待できる。

聴覚情報を用いて道路交通騒音を表現しようとする既往の研究に、永野ら⁴⁾の研究がある。これは、録画・録音したビデオを再生し、その再生レベルを操作することにより騒音を体感できるシステムである。一方、蒔苗ら⁵⁾は交通流シミュレーションと連動して騒音を体感できるシミュレータの開発を行った。また、Mourant⁶⁾らはドライビングシミュレータに連動して聴覚情報を出力する騒音シミュレータの開発を行った。しかし、物

理シミュレーションにより任意の地点(受音点)において計算された道路交通騒音の音圧レベルを、聴覚情報および視覚情報の両方を用いて、対話的かつリアルタイムに利用者に提示できるシステムの構築は行われていない。

そこで本研究では、近年注目されているVR(バーチャルリアリティ)技術を用いて、VR空間において、道路交通騒音の予測結果を聴覚情報と視覚情報の二種類の感覚情報により観察者に提示する対話型システムの構築を試みた。なお、騒音予測手法としては、幾何音響理論に基づくASJ RTN-Model 2008³⁾(日本音響学会)を用いた。幾何音響理論に基づく方法は、波動音響理論に基づく方法に比べて精度と適用性に難点があるが、簡便でかつリアルタイム計算が可能な長所がある。また、VR装置としては、代表的なものにCAVEに代表される没入型VR装置とヘッドマウントディスプレイがあるが、本研究では実スケールで高い臨場感が得られる没入型VR装置を用いた。システムの構築には、C言語を用い、可視化にはOpenGLとCAVEライブラリ、可聴化には音響プログラミングソフトのMAX/MSPを使用した。本システムの妥当性および有効性を検証するため、本システムを平面道路部において、遮音壁や高架橋などを設置したケースに適用し、計算結果および計算時間の比較検討を、可視化情報および可聴化情報を用いて行った。また、VR空間内で音量として提示される聴覚情報と騒音の予測結果を一致させるため、騒音計を用いた実測に基づくキャリブレーションを行うと共に音場の空間的な特性について検討



図-1 没入型 VR 装置



図-2 周辺デバイス（左：液晶シャッター眼鏡，右：コントローラー）

を行った。

2. 開発環境

2.1 没入型 VR 装置

(1) 装置の概要

本システムでは、没入型投影技術⁷⁾⁸⁾ (Immersive Projection Technology:IPT) に基づく方法により VR 空間の構築を行っている。本システムで使用した没入型 VR 装置の外観を図-1 に示す。本装置は、3 面（前面、側面、底面）の大型平面スクリーンとそれぞれのスクリーンに対応した高性能プロジェクター（解像度：1400 × 1050、輝度：5000 ルーメン）により構成されている。なお、底面は反射型スクリーン、正面及び側面は透過型スクリーンとなっており、正面及び側面のスクリーンには背面からプロジェクターの映像の投影を行い、底面スクリーンには上方に設置したプロジェクターから投影を行っている。本装置では立体視の方式に液晶シャッター方式⁹⁾を採用しており、観察者は液晶シャッターメガネ（図-2 の左図）と呼ばれる特殊なメガネをかけ、底面スクリーンの上に立つことによって、立体視により構築された VR 空間へと没入することが可能となっている。また、コントローラー（図-2 の右図）を操作することで、VR 空間内で観察位置の移

表-1 コンピュータースペック

Master-PC	
Machine	HP xw9300 Workstation
CPU	Dual Core AMD Opteron (tm) 2.4GHz
Memory	8GB
Graphics Card	Nvidia Quadro FX4500
Slave-PC × 4	
Machine	HP xw9300 Workstation
CPU	Dual Core AMD Opteron (tm) 2.4GHz
Memory	8GB
Graphics Card	Nvidia Quadro FX4500

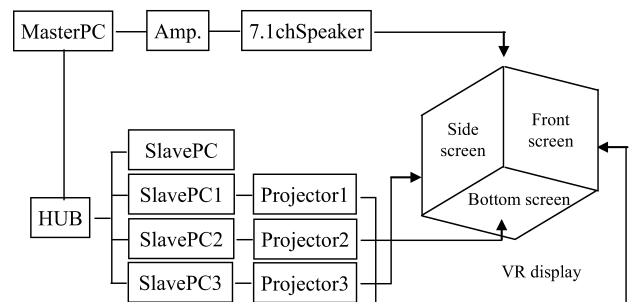


図-3 ネットワーク構成

動や計算条件の入力・変更を容易に行うことが可能となる。なお、本装置は 7.1ch(サラウンド 7ch, サブウーファー 1ch) の音響スピーカーが天井面に設置されており（図-1 参照）、立体映像とともに音を用いて VR 空間を構築することが可能である。

(2) ハードウェア構成とネットワーク

VR 装置のコンピュータは、Master-PC と 4 台の Slave-PC とで構成された PC クラスタシステムである。コンピュータのスペックを表-1 に示す。なお、VR 環境を構築しているハードウェアとネットワーク構成は図-3 に示す通りであり、ネットワーク通信には Giga-bit Ethernet (1000Base-T) を用いている。4 台の Slave-PC の内、1 台はヘッドトラッキングにより計測された視点位置（図-2 の液晶シャッター眼鏡に付いている白いマーカーの位置）を逐次追跡計算しており、これにより VR 空間内での観察者の視点情報の取得を行っている。残りの 3 台は、各プロジェクターと接続されており、各コンピュータは観察者視点の映像のうち、各スクリーンが担当する領域の映像を作成・配信する。なお、本装置のより詳細な説明は参考文献 10) を参照されたい。

2.2 ソフトウェア

本システムの構築には C 言語を使用した。なおプログラミングを行う際の主なライブラリには、立体映像の生成、スクリーン間の映像の同期、コントローラーの操

作など没入型 VR 環境を構築するために CAVE ライブラリ、VR 空間内に CG 映像を描画するために OpenGL を使用した。また、道路交通騒音の予測結果の可聴化には、音響プログラミングソフトの MAX/MSP¹¹⁾ を使用した。なお OS には、Windows XP を使用した。

3. VR 技術を用いた対話型道路交通騒音評価システム

3.1 システムの概要

本研究で構築したシステムの機能の概要を、図-4 に示す。本システムは、没入型投影技術に基づき構築した VR 空間内で、道路交通騒音の予測結果の可聴化及び可視化を行い、視覚情報と聴覚情報の二種類の感覚情報を観察者に提示するものである。本システムの有する特徴は、以下の 3 つである。1) 観察者は VR 空間内の任意の場所に移動可能である (図-4 (A))。2) VR 空間内で観察者は遮音壁の高さ、道路の舗装の種類などの道路の周辺環境を変更可能である (図-4 (B))。3) VR 空間内で観察者は自動車の種類、自動車の速度などの自動車の走行条件を変更可能である (図-4 (C))。

本システムでは、道路交通騒音の予測結果を提示する方法として、a) 受音点を固定 (指定) して、移動する自動車の CG 映像と共に音圧レベルを音として可聴化する方法 (以後 a) の方法とする)、b) 時間を固定 (指定) して、音圧レベルの空間分布を可視化する方法 (以後 b) の方法とする)、がある。図-5 に、それぞれの方法のフローチャートを示す。なお、本システムでは計算条件の設定からポストプロセスまでの処理をリアルタイムで行っており、計算条件により変化する騒音の予測結果を瞬時にかつ対話的に確認することが可能となっている。以下に本システムの処理の詳細について、図-5 に示すフローチャートに沿って記す。

3.2 プリプロセス

(1) 形状データの作成

道路周辺に建設する遮音壁、高架橋及び自動車の形状データを作成する。なお本研究では、三次元 CAD ソフト (AutoCAD : Autodesk 及び 3dsMax : Autodesk) を用いてこれらの形状データの作成を行った。

(2) メッシュデータの入力

本システムでは騒音レベルの等値面の三次元表示を行うため、これらを求めるために道路周辺に生成したメッシュデータの入力を行う。なお、本研究では節点数 67,626、要素数 375,000 の四面体のメッシュデータ (道路横断面の水平方向 2m、鉛直方向 1m、奥行き方向 2m) を入力した。

(3) 計算条件の設定

道路交通騒音レベルの算出を行う際に必要な入力データは、自動車及び受音点の位置情報、自動車の走行条

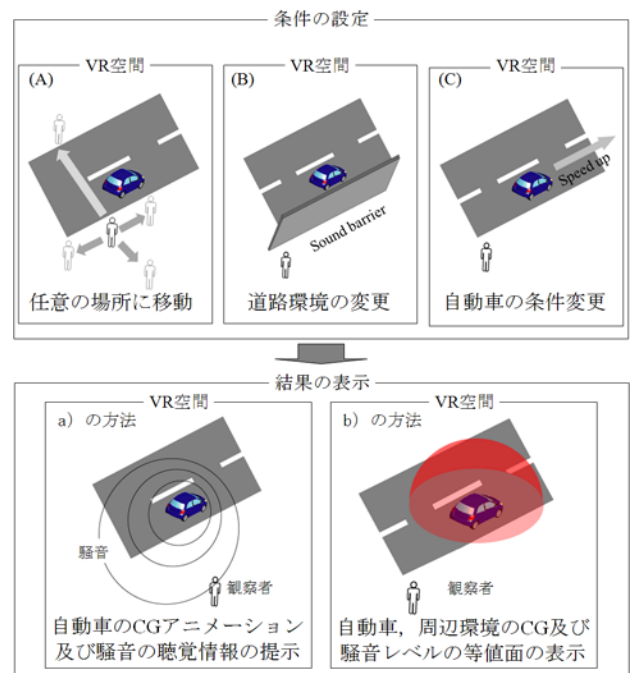


図-4 本システムの機能の概要

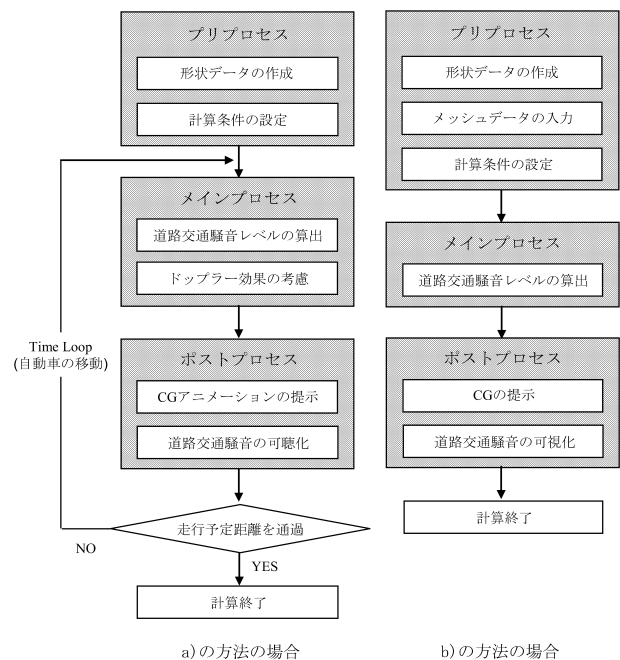


図-5 本システムの処理工程

件、道路の周辺環境である。受音点の位置情報は 2.1 で述べたトラッキング装置において逐次計測されており、計測された数値情報が自動的に入力される。なお、騒音の予測結果の提示方法として、b) の方法が選択された際には、(2) で入力されたメッシュの全節点を受音点として音圧レベルの算出を行う。また、自動車の位置情報は VR 空間内で提示される自動車の CG アニメーションの位置情報が逐次入力される。なお、b) の

-- dB	sound barrier	distance	car	passage years of pavement	type of pavement	car speed	010m
-- dB	0m	100m	standard	0	drainage	50km/h	
sound barrier	0m	1m	2m	3m	4m	5m	
distance	100m	200m	400m	600m	800m		
car	standard	subcompact	medium	large			
passage years of pavement	0	5	10	15			
type of pavement	dense	drainage					
car speed	50km/h	60km/h	70km/h	80km/h	90km/h	100km/h	

図-6 インターフェイス（上2段：選択された設定条件，下6段：設定条件メニュー）

場合には時間は固定（自動車は静止した）状態であるが、コントローラーを操作することで自動車の走行車線と位置を自由に変更することが可能となっている。

また、本システムではVR空間内において観察者が自動車の走行条件、道路の周辺環境を対話的に変更することが可能となるインターフェイスを開発した。本機能では、観察者がコントローラー（図-2の右図）を操作し、VR空間内に表示されたインターフェイスを操作することにより計算条件を対話的に変更することが可能である。本機能を用いて設定・変更できる道路の周辺環境と自動車の走行条件は、遮音壁の高さ（0～5m）、舗装の種類（密粒性アスファルトコンクリート舗装、排水性舗装）、舗装後の経過年数（0～15年）、自動車の種類（乗用車、小型貨物車、中型車、大型車、二輪車）、自動車の速度（50～100km/h）である。また可視化する際には、描画する騒音レベルの数値（40～55dB）及び等値面の数（1～3面）を変更することも可能となっている。また本機能では、道路の周辺環境や自動車の走行条件、観察者の位置における騒音のA特性音圧レベル、A特性音圧レベルのユニットパターンの最大値、車線から受音点までの距離を確認できるようにするために、それらの情報を提示するインターフェイスの作成も行った。実際にVR空間内において表示されるインターフェイスを図-6に示す。なおインターフェイスは表示されないが、コントローラーを操作することで、遮音壁の設置条件（道路の両端または片側）、高架橋の有無を変更することも可能となっている。

3.3 メインプロセス

本システムでは、幾何音響理論に基づいて日本音響学会が作成した道路交通騒音予測モデルのASJ RTN-Model 2008³⁾を用いて道路交通騒音レベルを算出している。また予測結果の提示方法としてa)を選択した際には、より臨場感のある道路交通騒音の聴覚情報を提示するために、ドップラー効果による周波数の変化についても考慮している。

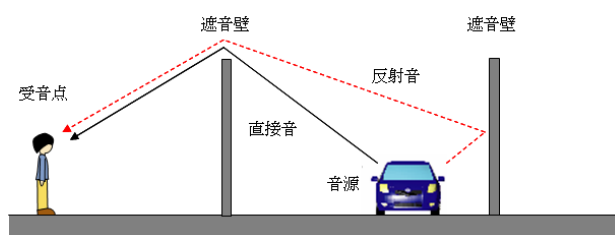


図-7 平面道路部における伝搬経路

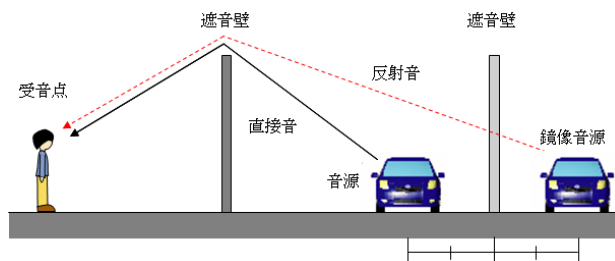


図-8 平面道路部における鏡像音源位置

(1) 道路交通騒音レベルの算出

ASJ RTN-Model 2008 は、幾何音響理論に基づいており、簡便でかつ高速に計算を行うことが可能である。計算手順は二段階に分かれ行われる。まず最初に自動車が放射するA特性音響パワーレベルを算出し、次にその結果を用いて音源から受音点までの伝搬計算を行う。伝搬計算では、遮音壁や高架橋の有無などの道路周辺環境に応じて、考慮する伝搬音の種類や数が異なり、それらは互いに干渉がないものとして合成することにより、受音点における騒音レベルが算出される。

step.1 音響パワーレベルの算出

自動車走行騒音のA特性音響パワーレベル L_{WA} は次式で与えられる。

$$L_{WA} = a + b \log_{10} V + C \quad (1)$$

ここで、 a は車種別に与えられる定数、 b は速度依存性を表す係数、 V は自動車の走行速度、 C は基準値に対する補正項を示す。なお、基準値に対する補正は次式で与えられる。

$$C = \Delta L_{surf} + \Delta L_{grad} + \Delta L_{dir} + \Delta L_{etc} \quad (2)$$

ここで、 ΔL_{surf} は舗装の種類や経過年数など路面に関する補正量、 ΔL_{grad} は道路の縦断勾配に関する補正量、 ΔL_{dir} は指向性に関する補正量、 ΔL_{etc} はその他の要因に関する補正量を示す。なお、各補正量の詳細については参考文献3)を参照されたい。

step.2 伝搬計算

本システムが対応している道路環境は、平面道路部、高架・平面道路併設部である。以下に、受音点における騒音レベル（A特性音圧レベル）の算出方法を各道路環境ごとに記す。

①平面道路部

図-7 に示す平面道路部では、直接音と反射音を考慮し騒音レベルは次式により求めることができる。

$$L_A = 10 \log_{10} \left(10^{\frac{L_A^d}{10}} + 10^{\frac{L_A^r}{10}} \right) \quad (3)$$

ここで、 L_A^d と L_A^r はそれぞれ、直接音と反射音の A 特性音圧レベルを示し、次式によって与えられる。

$$L_A^d = L_{WA} - 8 - 20 \log_{10} r_0 + \Delta L_{cor} \quad (4)$$

$$L_A^r = L_{WA} - 8 - 20 \log_{10} r_1 + \Delta L_{cor} + \Delta L_{refl} + \Delta L_{abs} \quad (5)$$

ここで、 L_{WA} は自動車の A 特性音響パワーレベル、 r_0 は音源から受音点までの直達距離、 r_1 は鏡像音源から受音点までの直達距離で、図-8 に示す鏡像モデルから算出される。また、 ΔL_{cor} は音源から受音点に至る音の伝搬に影響を与える各種の減衰に関する補正量、 ΔL_{refl} は反射面が有限であることに関する補正量、 ΔL_{abs} は反射面の吸音性に関する補正量を示す。なお、 L_{cor} は次式で与えられる。

$$\Delta L_{cor} = \Delta L_{dif} + \Delta L_{grnd} + \Delta L_{air} \quad (6)$$

ここで、 ΔL_{dif} は回折に伴う減衰に関する補正量、 ΔL_{grnd} は地表面効果による減衰に関する補正量、 ΔL_{air} は空気の音響吸収による補正量である。なお、各補正量の詳細については参考文献 3) を参照されたい。

②高架・平面道路併設部

図-9 に示す高架・平面道路併設部では、騒音レベルは次式により求めることができる。

$$L_A = 10 \log_{10} (10^{L_{A,0}/10} + 10^{L_{A,1}/10} + 10^{L_{A,2}/10} + 10^{L_{A,3}/10}) \quad (7)$$

ここで、 $L_{A,0}$ は直接音、 $L_{A,1}$ は高架裏面反射音、 $L_{A,2}$ 、 $L_{A,3}$ は二種類の裏面地面反射音の A 特性音圧レベルを示す。なお、直接音 $L_{A,0}$ は式 (4) を用いて算出され、高架裏面反射音 $L_{A,1}$ 、及び裏面地面反射音 $L_{A,2}$ 、 $L_{A,3}$ は次式で与えられる。なお、計算には図-10 に示す鏡像モデルを用いた。

$$L_{A,i} = L_{WA} - 8 - 20 \log_{10} r_i + \Delta L_{dif, sb, i} + \Delta L_{refl, slit, i} + \Delta L_{abs} \quad (8)$$

$i = 1 \sim 3$

ここで、 L_{WA} は自動車の A 特性音響パワーレベル、 r_i は i 番目の鏡像音源から受音点（又は受音点の鏡像）までの直達距離、 $\Delta L_{dif, sb, i}$ は i 番目の鏡像音源からの遮音壁の回折に伴う減衰に関する補正量、 $\Delta L_{refl, slit, i}$ は反射面が有限長であることに関する補正量、 ΔL_{abs} は高架裏面の吸音に関する補正量を示す。なお、橋脚の影響については無視している。

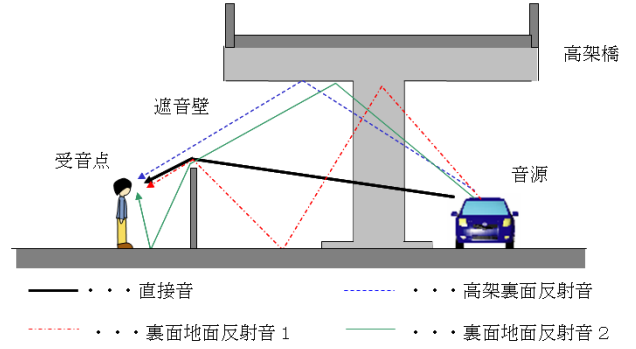


図-9 高架・平面道路併設部における伝搬経路

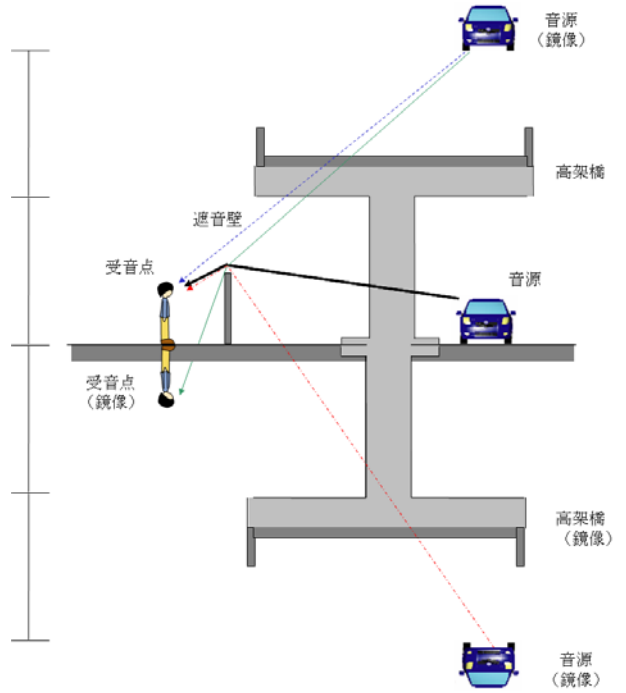


図-10 高架・平面道路併設部における鏡像音源位置

(2) ドップラー効果の考慮

本システムでは、受音点の移動は考慮しておらず、ドップラー効果による周波数の変化は以下のように示すことができる。

$$f' = f \left(\frac{U}{U - u_s \cos \theta_s} \right) \quad (9)$$

ここで、 f は音源の有する周波数、 U は音速、 u_s は音源の移動速度、 θ_s は音源と受音点を結ぶ直線と音源の移動方向の間の角度を示している（図-12 参照）。

3.4 ポストプロセス

(1) CG の提示

自動車及び道路周辺の CG 映像を VR 空間内に提示する。なお提示する CG 映像は、入力した計算条件に応じて対話的に変化する。また a) の方法を選択した場合には、自動車位置は音による聴覚情報と共にアニ

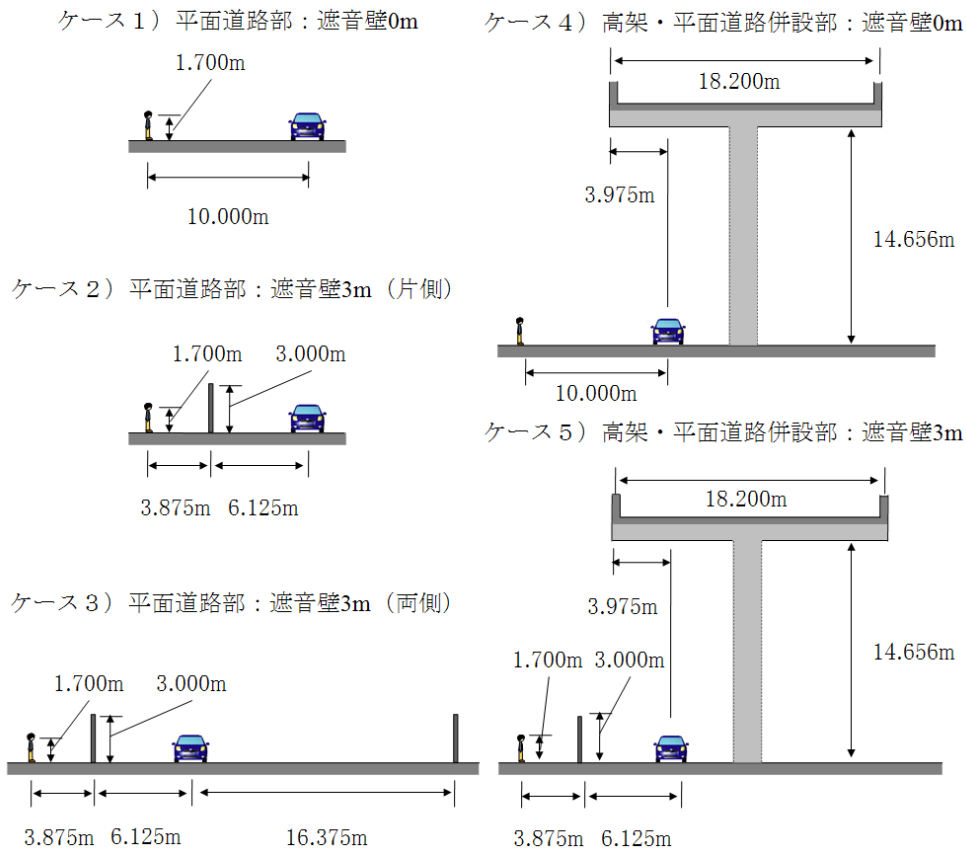


図-11 計算モデル（断面図）

メーションとして提示される。

(2) 道路交通騒音レベルの可聴化

本システムでは、a)の方法を選択した場合、道路交通騒音の予測結果の可聴化には音響プログラミングソフトのMAX/MSPを用いている。MAX/MSPに入力するデータは、受音点における道路交通騒音のA特性音圧レベル、ドップラー効果による周波数の変化、そして道路交通騒音を別途録音したwaveデータである。データの inputs は常に繰り返し行っているため、騒音レベルや周波数の変化に対応した音を常に出力することが可能となっている。

(3) 道路交通騒音レベルの可視化

本システムでは、b)の方法を選択した場合、騒音の影響範囲を容易に把握できるようにするために、OpenGLを用いて騒音レベルの等値面を描画している。等値面を描画する際には、まず算出した各節点の音圧レベルを用いて、格子の辺上において等値面を描画する騒音レベルとなる位置を一次補間により探索する。そして、探索したポイントを三角形ポリゴンを用いて結ぶことにより等値面の形状データを作成する。最後に、より立体感のある等値面を描画するために、等値面の法線ベクトルを算出し、最後に形状データ、法線ベクトルを用いてOpenGLによる等値面の描画を行っている。

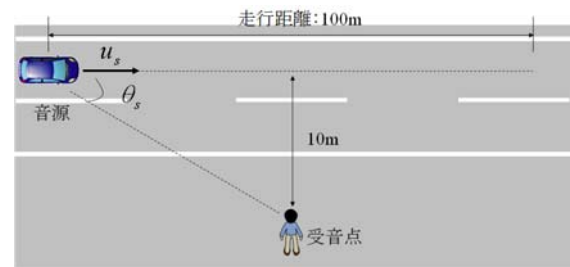


図-12 計算モデル（平面図）

4. 数値解析例

4.1 適用事例

本システムの妥当性および有効性を検証するため、本システムを平面道路部において、遮音壁や高架橋などを設置したケースに適用し、計算結果および計算時間の比較検討を、可視化情報および可聴化情報を用いて行った。

(1) 騒音レベルの比較

本システムの適用を行った道路環境は、ケース1)平面道路部：遮音壁0m、ケース2)平面道路部：遮音壁3m（片側）、ケース3)平面道路部：遮音壁3m（両側）、ケース4)高架・平面道路併設部：遮音壁0m、ケース

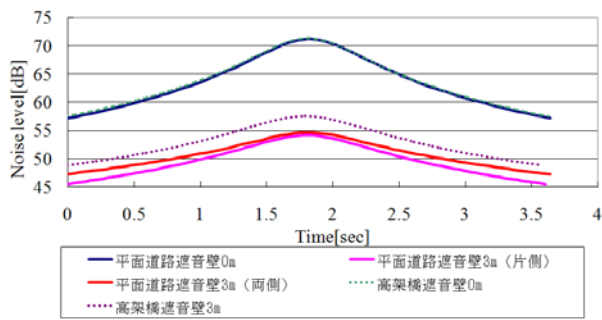


図-13 各道路環境のユニットパターン



図-14 道路交通騒音の聴覚情報を体感している様子

表-2 各道路環境のユニットパターンの最大値

道路環境	ユニットパターン 最大値[dB]
ケース 1) 平面道路部：遮音壁0m	71.3
ケース 2) 平面道路部：遮音壁3m (片側)	54.2
ケース 3) 平面道路部：遮音壁3m (両側)	54.7
ケース 4) 高架・平面道路併設部：遮音壁0m	71.4
ケース 5) 高架・平面道路併設部：遮音壁3m	57.6

5) 高架・平面道路併設部：遮音壁 3m である。また、その他の計算条件は、自動車の種類：乗用車、自動車の速度：100km/h、舗装の種類：排水性舗装、舗装後の経過年数：0 年、車線～観察者までの距離：10m とした。計算モデルの断面図を図-11 に、平面図を図-12 に示す。なお、形状モデルの作成は、実在する構造物データを基に作成した。

a) の方法（受音点位置を固定して、移動する車両の CG 映像の描画と共に可聴化を行う場合）の結果として、自動車が図-12 に示す走行距離を走る場合の受音点における音圧レベルのユニットパターンの比較を図-13 に示す。また、図-14 に、観察者が時々刻々と

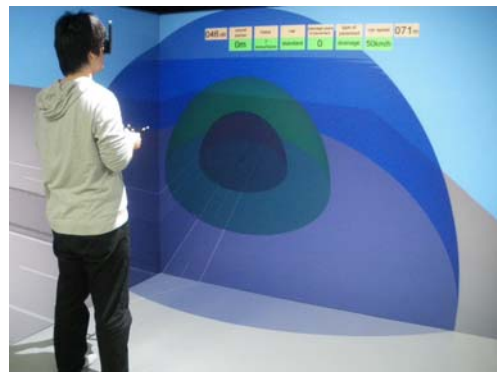


図-15 VR 空間内で騒音レベルの分布を観察している様子
(ケース 1) 平面道路部：遮音壁 0m)

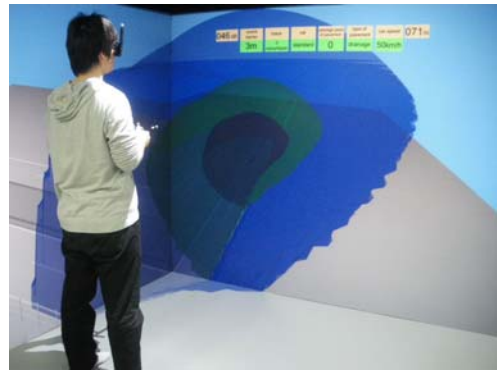


図-16 VR 空間内で騒音レベルの分布を観察している様子
(ケース 2) 平面道路部：遮音壁 3m (片側))



図-17 VR 空間内で騒音レベルの分布を観察している様子
(ケース 4) 高架・平面道路併設部：遮音壁 0m)

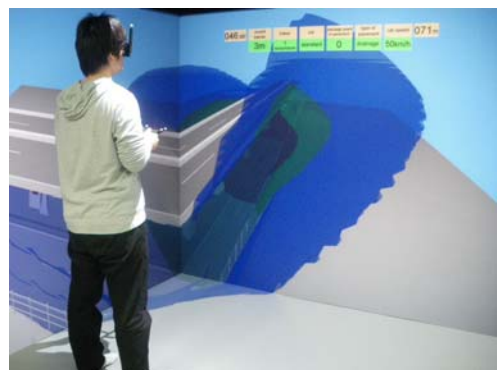


図-18 VR 空間内で騒音レベルの分布を観察している様子
(ケース 5) 高架・平面道路併設部：遮音壁 3m)

表-3 a) の方法の場合の計算時間

道路環境	計算時間 (1ステップあたり) [sec]
ケース1) 平面道路部：遮音壁0m	0.041
ケース2) 平面道路部：遮音壁3m (片側)	0.043
ケース3) 平面道路部：遮音壁3m (両側)	0.047
ケース4) 高架・平面道路併設部：遮音壁0m	0.060
ケース5) 高架・平面道路併設部：遮音壁3m	0.074

表-4 b) の方法の場合の計算時間

道路環境	計算時間：[sec]
ケース1) 平面道路部：遮音壁0m	0.604
ケース2) 平面道路部：遮音壁3m (片側)	0.830
ケース3) 平面道路部：遮音壁3m (両側)	1.103
ケース4) 高架・平面道路併設部：遮音壁0m	1.170
ケース5) 高架・平面道路併設部：遮音壁3m	1.329

自動車が移動する CG アニメーションとともに可聴化された自動車騒音をリアルタイムに聞いている様子を示す。また、各ケースにおけるユニットパターンの最大値を表-2 に示す。これらの結果より、遮音壁が設置されているケースでは、遮音壁がないケースに比べて騒音レベルが大幅に低減されることが分かる。また、遮音壁が道路の両端に設置されているケースや高架橋が設置されているケースでは、反射音の影響により、騒音レベルが増大し、実際の現象と定性的にはあるが一致することが確認できた。また、b) の方法（時刻レベルを固定して音圧レベルの空間分布の等値面表示による可視化を行う場合）の結果として、各道路環境における騒音レベルの等値面を描画した結果を図-15～18 に示す。この結果表示では、50dB、55dB、60dB の等値面を表示している。図より、道路周辺に構造物が何も設置されていないケース1) の場合には騒音が半球状に等方に伝播している様子が再現され、妥当な結果となっていることが分かる。また、遮音壁や高架橋が設置されているケースでは、それらの構造物を回折する様子が確認でき妥当な結果と言える。以上の結果より、本システムは騒音の伝搬状況を定性的にはあるが妥当に再現可能であるといえる。

(2) 計算時間の比較

次に、本システムのリアルタイム性を検証するために、上記の道路環境において計算時間の比較を行った。表-3 に、受音点位置を固定して、移動する車両の CG 映像の描画と共に可聴化を行った際 (a) の方法を選択した場合) の 1 ステップにかかる計算時間を示す。これより、形状が複雑になると共に伝搬音の計算量が増加するために、計算時間が増大しているものの、いずれのケースも 0.1 秒以下であり、リアルタイム処理が可

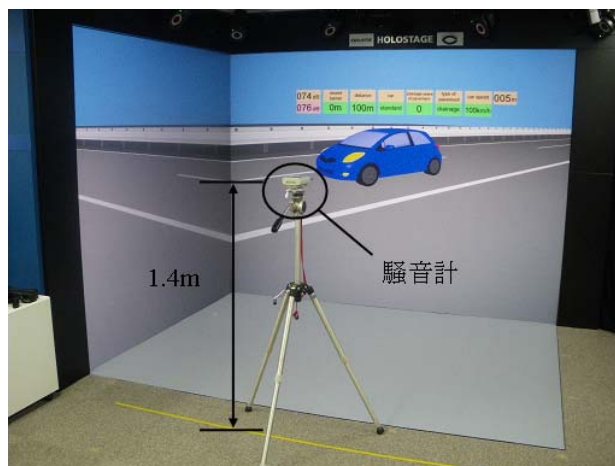


図-19 聴覚情報の計測を行っている様子 (ケース1)

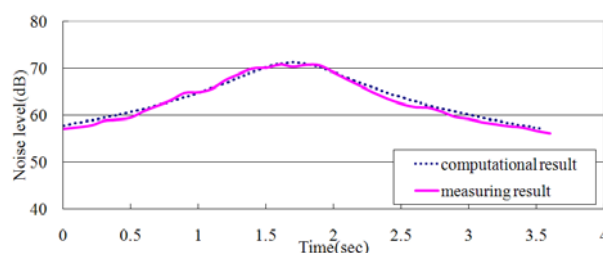


図-20 キャリブレーション後のユニットパターン (ケース1) 平面道路部：遮音壁 0m)

能であることが分かる。また、表-4 に時刻レベルを固定して音圧レベルの空間分布の等値面表示による可視化（等値面を 3 面表示）を行った際 (b) の方法を選択した場合) の計算時間を示す。表より、表-3 の場合と同様に形状が複雑になるほど計算時間が増えるが、最大でも 1.4 秒以下であり、十分に短い時間で等値面を描画できることが確認できた。以上の結果より、本システムはリアルタイム処理可能なシステムであるといえる。

4.2 聴覚情報のキャリブレーションと空間分布

観測者が正確な道路交通騒音を体感するためには、VR 空間内で出力される聴覚情報と計算によって求められた騒音レベルの数値を一致させる必要がある。そこで本研究では、図-19 に示す位置に騒音計 (LA-2560: 小野測器) を設置し、実測に基づくキャリブレーションを行った。なお、キャリブレーションは MAX/MSP に入力する騒音レベルに対して行っており、スピーカーから出力される音と予測結果が一致するように設定した。

次に、キャリブレーションを行った結果を確認するために、本システムを図-11 に示す各ケースに適用し、計算結果と聴覚情報の計測結果の比較を行った。図-20 にその一例として、ケース1) で、自動車の種類：

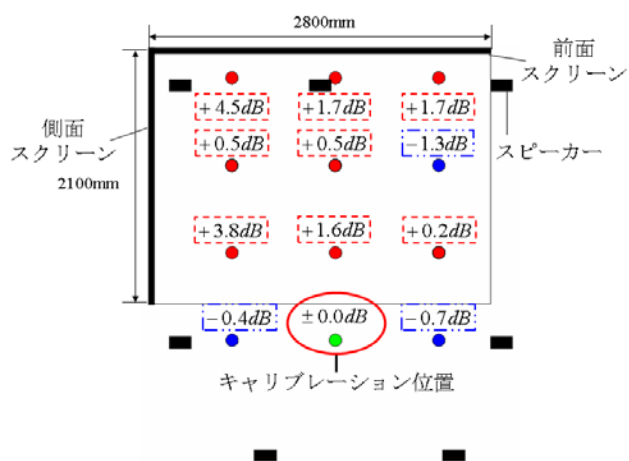


図-21 聴覚情報の空間分布 (高さ 1.4m)

乗用車、自動車の速度：100km/h、舗装の種類：排水性舗装、舗装後の経過年数：0年、車線～観察者までの距離：10mの場合の、計算結果と騒音計による計測結果のユニットパターンの比較を示す。図より計算結果と計測結果がほぼ一致していることがわかる。以上の結果より、キャリブレーションを行った位置（受音点）においては、道路交通騒音レベルの予測結果どおりの聴覚情報を再現できることが確認できた。なお、図-20において、計測結果と計算結果に若干の差異が生じているが、その原因は、道路交通騒音の録音データ自体の音圧レベルが一定ではなく2dB程度の変動があるためである。本システムを、同じ計算条件を用いてその他のケース2)-5)についても適用した結果、ユニットパターンにおいて計測結果と計算結果は良い一致を示すことを確認した。また、キャリブレーションを行った位置以外における聴覚情報の空間分布を調べるために、VR装置内の複数箇所において聴覚情報の計測を行った。その結果をキャリブレーション位置の音圧レベルを基準にしてその差を示したものを図-21に示す。図より、スピーカーの設置されている位置や方向、スクリーンからの反射の影響などにより、VR空間内の音場は複雑な分布をしており、キャリブレーション位置以外では数dB程度（最大で4.5dB）の変動が生じていることが分かった。

5. 結論と今後の課題

本研究では、VR技術を用いて道路交通騒音の大きさを聴覚および視覚の二種類の感覚情報を用いて評価可能な対話型道路交通騒音評価システムの構築を行った。本システムの妥当性および有効性を検証するため、本システムを平面道路部に遮音壁や高架橋を設置したケースに適用した結果、以下の結論を得た。

- 本システムは、道路交通騒音レベルの予測結果を、

ほぼリアルタイムでCGによる視覚情報と音による聴覚情報により提示することが可能である。また、計算結果は定性的に妥当であることが確認された。

- 本システムは、観察者がVR空間内で、インターフェイス機能を用いてコントローラにより道路環境や自動車の走行条件を変更可能であり、道路交通騒音の評価・検討を対話的に行うことが可能である。
- 可聴化された道路交通騒音レベルの予測結果を騒音計を用いて測定し、キャリブレーションを実施することにより、観測点（キャリブレーション位置）において予測結果どおりの道路交通騒音を提示することが可能となった。また、VR空間内の音場は複雑な分布をしており、キャリブレーション位置以外では数dB程度（最大で4.5dB）の変動特性があることが明らかとなった。

今後は、本システムを建物等を含む複雑な道路環境に適用可能とすると共に、実測結果との比較により精度検証を定量的に行う予定である。また、立体音響場の構築も今後の課題である。

参考文献

- 1) 田村正行：境界要素法による屋外騒音伝搬の予測，日本音響学会誌，Vol.48，pp.451-454，1992。
- 2) 野村卓史，高木耕平：気象要因の影響を考慮した音の伝播に関する有限要素解析法，応用力学論文集，Vol.9，pp.221-230，2006。
- 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 2008”，日本音響学会誌，Vol.65，pp.179-232，2009。
- 4) 永野剛，安田徳興，降旗建治，柳沢武三郎：騒音体験用バーチャルリアリティシステムの検討，電子情報通信学会技術研究報告，pp.33-40，1999。
- 5) 蒔苗耕司，高橋幸治：3次元サウンドを用いた道路交通騒音予測・聴感シミュレータ，土木情報利用技術論文集，Vol.12，pp.133-138，2003。
- 6) Mourant R.R. and Refsland D.：Developing a 3D Sound Environment For a Driving Simulator，*Proceedings of the Ninth International Conference on Virtual Systems and Multimedia*，pp. 711-719，2003。
- 7) 小木哲朗：没入型ディスプレイの特性と応用の展開，ヒューマンインタフェース学会論文誌，Vol.1，No.4，pp.43-49，1999。
- 8) E.J.Wegman and J.Symanzik：Immersive Projection-Technology for Visual Data Mining，*Journal of Computational and Graphics Statistics*，Vol. 11，pp.163-188，2002。
- 9) 廣瀬通孝：バーチャル・リアリティ，産業図書，1993。
- 10) 高田知学，樫山和男，谷口健男，浜田秀敏：都市大気環境シミュレーションのための三次元都市モデリング手法とプリ・ポスト処理へのVR技術の適用研究，土木情報利用技術論文集，Vol. 17，pp. 279-286，2008。
- 11) ノイマンピアノ（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。

(2010年3月9日 受付)