

可視化・可聴化技術を用いた VR 騒音評価システムの開発

谷川 将規

(技術研究所)

VR system for Noise Evaluation using Visualization and Spatialization Technique

by Masaki Tanigawa

Abstract

This paper presents a development of noise evaluation system based on virtual reality technology and spatialization of sound using ambisonics technique. Focusing on road traffic noise problem, this VR system is adopted the effective numerical method of sound, which is considered the direction of the sound wave and delay time for multiple moving-sound sources. Furthermore, to improve the reality, the source signals for the spatialization in VR space are generated from the actual measurement data of the various car driving tests. In order to investigate the validity of the method, this system is applied to several benchmark problems about the sound wave diffraction of the wall.

概要

本論文は、VR 技術と立体音響技術のひとつである Ambisonics による立体音響化による騒音評価システムの開発について述べる。この VR システムは交通騒音問題に着目し、多数の移動音源に対応して音波の到来方向や到達遅れ時間を考慮した効率的な音響計算法を用いた。さらに現実感を向上するため、実際の自動車走行音から音源信号を生成した。本手法の適用性を検討するため、防音壁による音波回折に関わるいくつかのベンチマーク問題に適用した。

§1.はじめに

近年、VR (バーチャルリアリティ) 技術は CG などによる単なる 3 次元的な視覚情報の提示だけでなく、聴覚、臭覚、触覚などの多様なインターフェースを組み合わせ、ユーザーの環境評価用のツールとしての活用が注目されている¹⁾。建築土木分野では計画・企画段階の建造物周辺環境を VR で再現してユーザーに評価してもらい、その結果を設計にフィードバックするなどの有効な活用が考えられる。本研究では、そのひとつとして道路交通騒音問題に着目する。

道路交通騒音に対する最も一般的な対策として防音壁の設置が挙げられる。しかしながら、過度な防音壁の設置は、視環境の悪化や日照量の低下などの問題を招く懸念がある。

3次元 CG による VR は防音壁などが道路周辺環境へおよぼす影響を視覚的に把握することを容

易にする²⁾。これに加えて交通騒音の音響数値シミュレーション³⁾を行い、その結果を音響情報として提示する可聴化技術を組み合わせれば、より直観的な環境評価が可能となり、対策効果の事前確認、対策箇所の重点化あるいは設計者、施工者および周辺住民などの間の合意形成が円滑に進むことが期待される。すなわち、道路交通騒音対策の評価に用いる VR は交通状況、騒音対策条件、ユーザー位置などを要望に応じて適宜変更し、さらにその結果が映像と音響として瞬時にして VR 空間内に反映される必要がある。この点に着目して、榎山ら^{4) 5)}は VR 技術を用いた道路交通騒音評価システムを開発している。榎山らのシステムは道路周辺環境を CG により可視化し、その交通状況に応じた自動車走行音をリアルタイムに計算して提示する。しかしながら、ここで採用されている音響計算法は簡易計算法であって、音波の到来方向や到達時間の遅れ等を考慮せず、任意の

複雑な音場を3次元的に再現(以下、立体音響化と記す)するのは困難であった。

本研究では檜山らのVRシステムをベースに新たな音響数値シミュレーション手法を構築し、VR空間内でのリアルタイムの立体音響化を実現した。本論文では立体音響化されたVRシステムの概要を述べ、立体音響に特化した交通騒音の数値シミュレーション手法と立体音響用音源信号の作成について述べる。さらに立体音響場手法の妥当性を検討した結果を報告する。

§2.VRシステムの概要

本研究で用いる没入型VR装置(Holostage)は、図-1に示すように前面、側面および底面の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装置内の利用者の動きを捉える光学式トラッキング装置を有する。それらは制御用の並列計算機に接続されている。表-1はVR用計算機の諸元であり、図-2はそのネットワーク構成を表す。ヘッドトラッキングにより計測された利用者の視点位置やコントローラの位置を逐次計算し、これに応じた映像を各計算機が作成・配信する。また音響情報を提示するための計8チャンネルのスピーカが備わる。

多チャンネル制御の立体音響化によるシステムは負荷軽減のため、図-3に示すように本システムは可視化部、可聴化部、制御部の3つのパートで構成することにした。

各部はOpen Sound Control(OSC)と呼ばれるプロトコルを利用して、音源や観測者位置情報や音響計算データを通信・共有し、画像と音響を同期して提示する。このようにシステムを分化することによって、可視化部、可聴化部それぞれを独立に効率的に開発することができる。また各部のインターフェースを取り替えて、用途・目的に応じて柔軟なシステム構成を実現できる。例えば、ノートPC+ヘッドマウントディスプレイ+ヘッドホン(2ch)からなるプレゼンテーション用の小規模な構成を選択することもできる。

本システムでは、可視化部は没入型VR装置をデバイスとしてCAVELib[®](SGI社)とOpenGLを用いた独自プログラム(作成言語C++)により自動車と周辺環境のCGを各スクリーンに描画する。可聴化部はプログラミングソフトMax[™](Cycling'74社)上に独自に構築したプログラムにより音響計算と立体音響信号を提示する。制御部



図-1 没入型VR装置(中央大学檜山研究室)

表-1 VR用計算機の諸元

Cluster System	
Master PC & Slave PC × 3	
Machine	HP Z400 Workstation
CPU	Intel(R) Xeon(R) W3550 3.07GHz
Memory	16GB
Graphic Card	Nvidia Quatro FX4800
Track PC	
Machine	HP Z210 Workstation
CPU	Intel(R) Xeon(R) E31225 3.10GHz
Memory	16GB

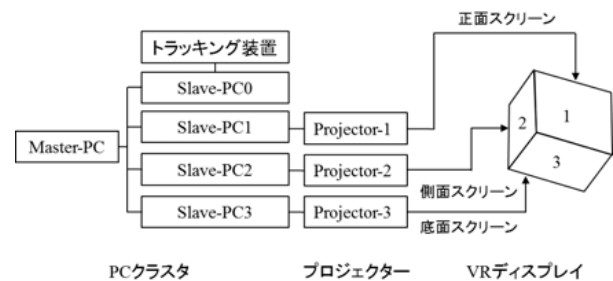


図-2 計算機ネットワーク構成

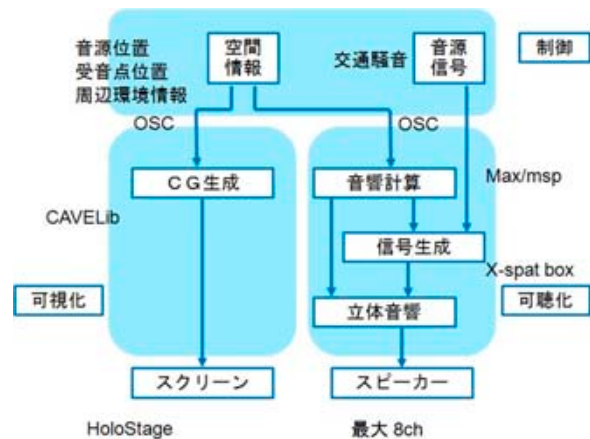


図-3 VRシステムの構成

は各部の空間・音響情報の授受を制御する。

ユーザーはコントローラを操作して VR 空間内で対話的にシミュレーション条件：① VR 空間内での観測位置、② 道路周辺環境(防音壁、高架橋、建物、盛土、切土、トンネルなど)、③ 走行車の車種、走行速度、方向を選択できる。VR 装置内での交通騒音の再現の状況を図-4 に示す。

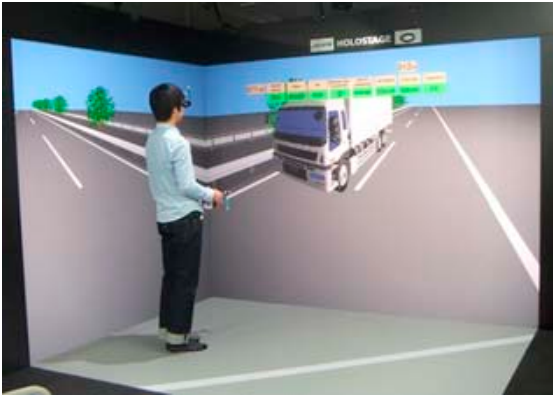


図-4 VR 空間内の交通騒音再現状況

S3.立体音響場の構築

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 considering して 3 次元的な音環境を再現することを指す。本論文では Ambisonics⁸⁾ に基づく立体音響手法を採用する。Ambisonics では、まず観測点における音圧を球面調和関数で展開し、一定次数以上の展開次数を無視することで音の到来方向のパターン、すなわち音の空間情報を近似的に求める。次にその空間情報に基づき、再生系(スピーカの位置や数)に応じた音響信号を再構成して提示する。当然ながら、より高次の展開次数を用いると実際の音場に近づくが、計算負荷は増大する。

Ambisonics による入力音源信号の立体音響化のブロック図を図-5 に示す。音源・観測点位置および周辺環境に応じて、後述する音響計算法により距離減衰、回折、反射などによるゲインを求め、入力音源信号(自動車走行音)の振幅を増幅する。その結果を Ambisonics により用いて立体音響化する。今回の Ambisonics 最大 3 次までの展開次数を用い、VR 装置天井に設けられた 7 つのスピーカを用いて音響信号を提示する。観測点から音源が直接見通せる場合、音波の到来方向が明らかな場合は Ambisonics による音場合成は有効である⁹⁾。しかしながら、防音壁などの伝播障害物により直接音が到来しない場合は、障害物端部などの 2 次

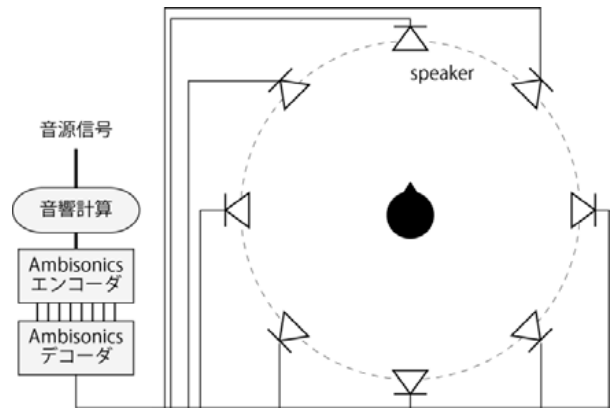


図-5 Ambisonics による立体音響化

音源から到来する音波の扱いを別途定める必要がある。

S4.交通騒音計算手法

本システムではリアルタイム性が求められるため、計算負荷の小さい音響計算法である日本音響学会の道路交通騒音予測モデル ASJ-RTN モデル 2008³⁾(以下、ASJ モデルと記す)を採用している。幾何音響理論に基づく ASJ モデルは交通騒音予測の簡易計算モデルであり、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などを考慮できる。

ただし、ASJ モデルは計算負荷が小さく扱いやすい反面、音のエネルギー収支のみを扱うため、音波の波動性を考慮しない。また音波の到来方向や到達時間の遅れなどは考慮されないという問題点があり、ASJ モデルのみでは立体音響化が難しい。

したがって、ASJ モデルによる音響計算結果を立体音響化するには、工夫が必要である。以下では、立体音響のための音響計算の例として有限長防音壁における音波回折問題を取り上げる。

図-6 に示すように、解析領域内に観測点 r 、単位強さの点音源 r_s 、有限長防音壁(伝播障害物) B があるとする。音源、伝播障害物は複数あっても良いが、ここでは議論を簡単にするため各々一つとする。観測点 r における音圧 $p(r, k)$ を次式で与える。

$$p(\mathbf{r}, k) = e^{i\mathbf{k}r} / r \quad (1)$$

ここに r は音源・観測点距離(= $\sqrt{r_s^2 - r}$)、 k は波数(= $2\pi f/c_0$)、 f は周波数、 c_0 は音速である。

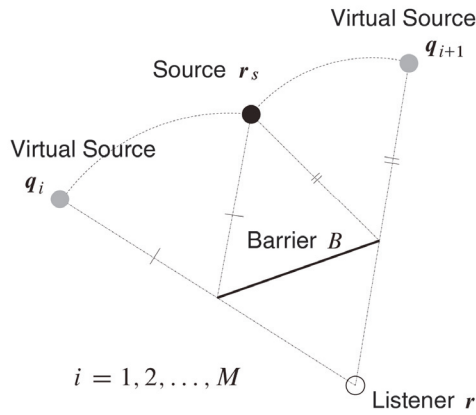


図-6 防音壁による回折音計算モデル

一方、ASJ モデルに基づく距離減衰、回折減衰を考慮した音圧レベル SPL (単位: dB) は簡便に次式で計算される。

$$\begin{aligned} SPL &= PWL - 20 \log_{10}(r) - 11 - \Delta D \\ &= 20 \log_{10}(|p(\mathbf{r}, k)|/P_0) \end{aligned} \quad (2)$$

ここに PWL は音源パワーレベル、 ΔD は回折減衰量、 P_0 は基準音圧(= 20×10^{-6} Pa) である。式(1)、(2)より次式を得る。

$$|p(\mathbf{r}, k)| = C \cdot \{(\hat{r}/r)10^{-\Delta D/20}\}/\hat{r} \quad (3)$$

ここに \hat{r} は回折パスの行路長であり、 $\{\cdot\}$ は回折減衰に関わる項を表す。また音源パワーレベルを 0 dB として基準化すれば、 C は距離減衰、回折減衰のいずれにも無関係な定数として与えられる。式(3) は実際の行路長 \hat{r} による距離減衰を考慮して $1/\hat{r}$ で括り出した形である。観測点から音源が直接見える場合は

$$\hat{r} = r, \quad \Delta D = 0$$

であり、回折の影響がある場合は

$$\hat{r} > r, \quad \Delta D > 0$$

である。本研究では回折減衰の周波数依存性を考慮するように次の前川チャートの近似式¹⁰⁾により ΔD を求める。

$$\Delta D = \begin{cases} 10 \log_{10} N + 13, & N \geq 1 \\ 5 \pm 9.1 \sinh^{-1}(|N|^{0.485}), & -0.322 \leq N < 1 \\ 0, & N < -0.322 \end{cases} \quad (4)$$

ここに N はフレネル数(= $2\delta f/c_0$)、 σ は直接音と回

折音の行路差(= $|\hat{r} - r|$)、 λ は波長である。また複号は $N < 0$ ならば +、 $N > 0$ ならば - を表す。

図-6 に示すように観測点と回折点を結ぶ直線上に仮想的な 2 次音源 q_i 、 $i = 1, 2, \dots, M$ (M は回折点の数) を考える。このときの q_i 位置は観測点を中心とする極座標系 (\hat{r}, θ, ϕ) でと表される。仮想音源から到来する音波は式(3) より次式で表される。

$$p_i = Q_i e^{ik\hat{r}}/\hat{r}, \quad Q_i = \{(\hat{r}/r)10^{-\Delta D/20}\} \quad (5)$$

ここに Q_i は振幅の増幅率である。式(5) は \hat{r} を用いて距離減衰を表し、回折減衰項を振幅の増幅率として表した形である。当然ながら、観測点での音圧は M 個の仮想音源からの寄与を合成して得られる。なお、このモデルでは音波の位相の再現性は考慮していない。ノイズ成分の多い交通騒音の評価に及ぼす影響は小さいと考えられるためである。

§5. 可聴化用音源データの作成

道路騒音の可聴化にあたっては、実際の自動車走行音に基づく現実感のある音源信号を用いることが望ましい。

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、種々の自動車による走行音を実測した。図-7 に示すように対象車が一定速度(速度 50、60、70、80、90、100 km/h の 6 条件)で往来する間の走行音をサンプリング周波数は 20 kHz で収録した。収録マイクロホンと対象車の距離は最短で 8.5m である。また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た。



図-7 自動車走行音測定状況

収録した走行音の例 (大型車、速度 90km/h) を図-8 (a) に示す。横軸は時間、縦軸は収録音の最大音圧を基準とした相対音圧である。走行音は距離減衰の影響を受け、測定点から自動車が離れるほど音圧は小さい。またドップラー効果の影響により音色も変化している。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、距離減衰などの影響を取り除く必要がある。紙面の都合上詳細は割愛するが、今回は図-8(b) に示すような観測点・対象車の位置を幾何学的関係から距離減衰などの影響をキャンセルするフィルタを導いた。

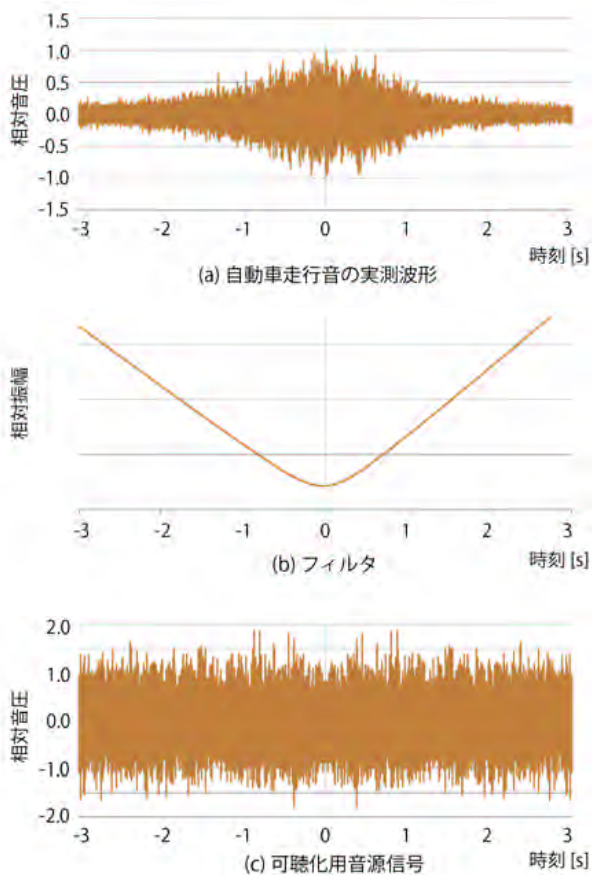


図-8 可聴化用音響信号の音響パワースペクト

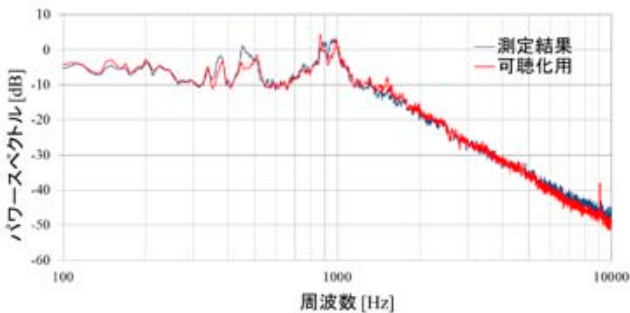


図-9 可聴化用音響信号の音響パワースペクトル

元波形にフィルタ処理を施した結果が図-8(c) である。図-9 は図-8 の処理前後の走行音波形から求めた音響パワースペクトルの比較である。図から明かなように両者のパワースペクトルはほぼ一致している。

§6.交通騒音評価の検証

立体音響化された交通騒音の検証のため、図-10 に示すような簡素なモデルを考える。音源 (自動車) は地盤面 $z = 0$ 上を x 方向に一定速度で移動する。また有限長防音壁 (幅 W 、高さ H) があるとす。ただし壁の厚みは無視する。観測点から防音壁までの距離は L_1 、防音壁から音源までの最短距離は L_2 である。自動車が防音壁の陰にあるとき、回折音は防音壁の上方および側方から回り込んで到来する。図-11 は、前節で述べた方法による自動車走行音の波形と音響パワースペクトルを示す。この音源信号を用いて自動車が防音壁近傍を通過する際の騒音を計算し、VR 装置内で立体音響化した。

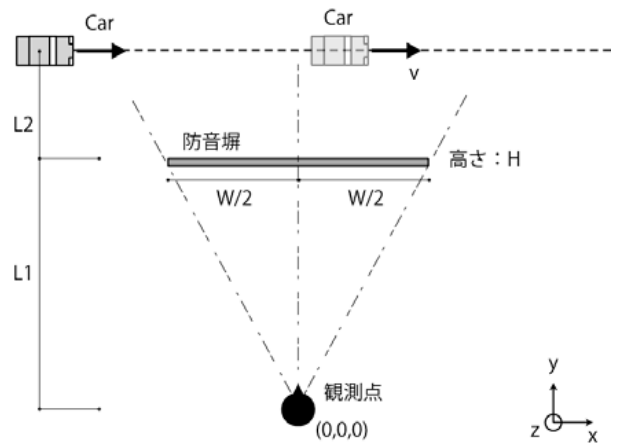


図-10 交通騒音評価の検証モデル

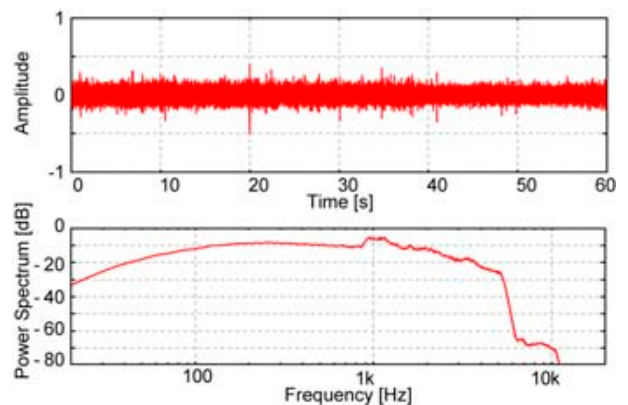


図-11 音源信号の波形と音響パワースペクトル

図-12 は VR 装置上部にあるスピーカ配置を示し、観測者の前方 (VR 空間内の防音壁を正面に見る) には 3 つのスピーカ (FL、CT、FR) がある。なお、防音壁は W を 3m、 H を 5m とした。

図-13 は、自動車が防音壁に対して左から右へ走行する際に各スピーカから再生される信号を表す。自動車の移動に応じて各スピーカからの再生信号が時間とともに変化する様子が確認される。自動車が接近するにともない左前スピーカ (FL) から順に再生音が大きくなり、自動車が防音壁の陰になるときは正面スピーカ (CT) から再生される。ただし、回折減衰の影響を受けるため全体的に振幅は小さい。自動車が走り去る際には右前スピーカ (FR) からの再生音が到来する。図-14 は図-13 と同条件において、VR 装置の中央位置 (高さ 1.5 m) に実際にマイクロホンを設置して観

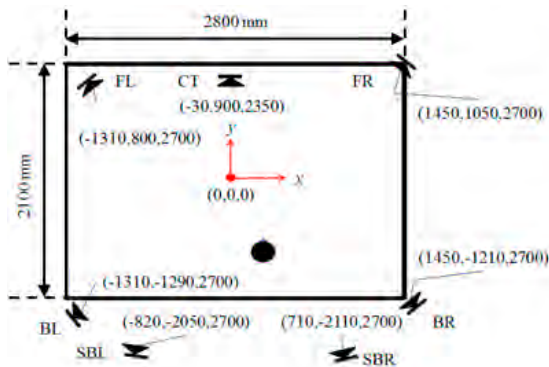


図-12 VR 装置既設のスピーカ配

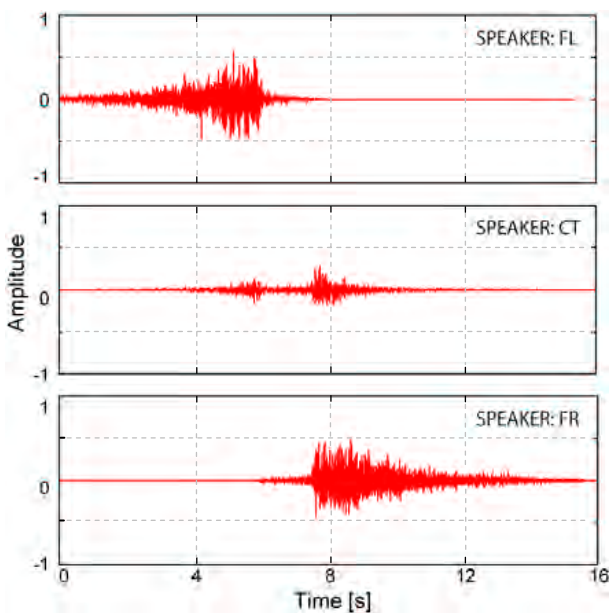


図-13 走行時に前面スピーカからの再生信

測された音圧波形と音響パワースペクトルを表す。これは、7つのスピーカからの寄与が足しあわされたものであり、VR 空間内で聴取する音である。なお空調ノイズなどの影響を極力排除するため、十分な SN 比を確保した上で計測を行っている。図-14 から、自動車が防音壁の陰になる約 7.0~8.0 s の間は回折減衰の影響が見られる。また図-14 下段は防音壁が無い条件で測定した音響パワースペクトルである。約 100 Hz 以上の周波数で回折減衰の影響が大きいことがわかる。

図-15 は防音壁幅 W を 15、20、25、30 m の 4 条件とした場合の VR 装置中央位置の騒音レベルの計測結果である。その他の条件は前述の通りである。防音壁の幅が大きいほど回折の影響で騒音レベルが低減する区間が長く、回折減衰量も大きいことが確認される。当然ながら、図-15 の結果は VR 装置のスクリーンや室内壁からの反射音の影響を受けているが、計測結果から求めた回折減衰量と ASJ モデルによる回折減衰量計算値との差は最大で 2 dB の範囲であった。この結果から、本 VR 装置内における交通騒音の評価は実用上十分可能であると判断される。

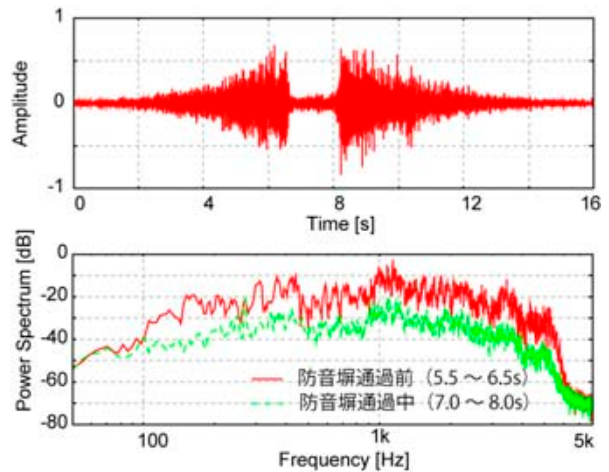


図-14 VR 装置中央位置における観測結果

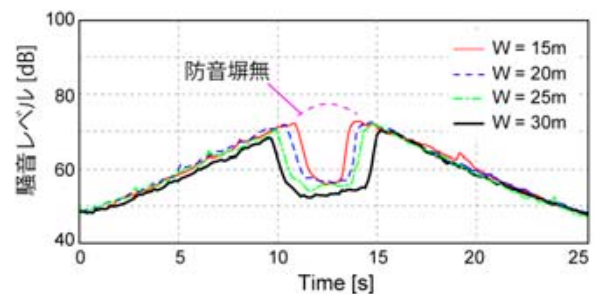


図-15 有限防音壁による回折減衰効果

§7.聴感上の再現性の確認

VR 空間内は室内壁や VR 装置スクリーンなどからの反射音やファンノイズなどの影響、すなわち音環境再現の外乱要因を完全に排除するのは難しい。そのため、聴感上の再現性が実用上十分に確保されていることを確認する必要がある。そこで、数値シミュレーションの結果と VR 空間内で実際に知覚される音環境の差異に関する簡易な被験者実験をおこない、立体音響の再現性の評価を行った。

被験者は正常な聴力を有する成人 (20~24 歳) の男女 6 名である。VR 装置内中央の所定位置に各被験者を立たせ、種々の交通騒音シミュレーション結果を提示し、各条件において音像が定位する方向をアンケート形式で回答させた。実験にあたって再生スピーカの配置は、**図-12** に示す天井に付設されたスピーカを用いる場合 (天井 SP 配置と記す)と **図-16** に示すように床面から高さ 1.5 m の水平面内に半径 1.5 m の円周上にスピーカを配置した場合 (水平 SP 配置と記す) の 2 条件

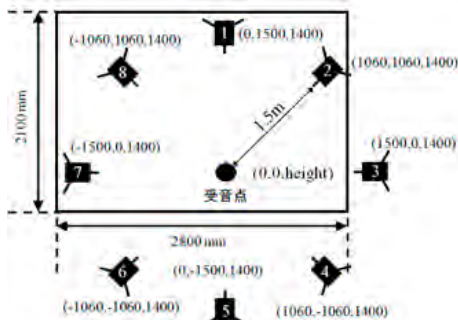


図-16 水平面内のスピーカ配置

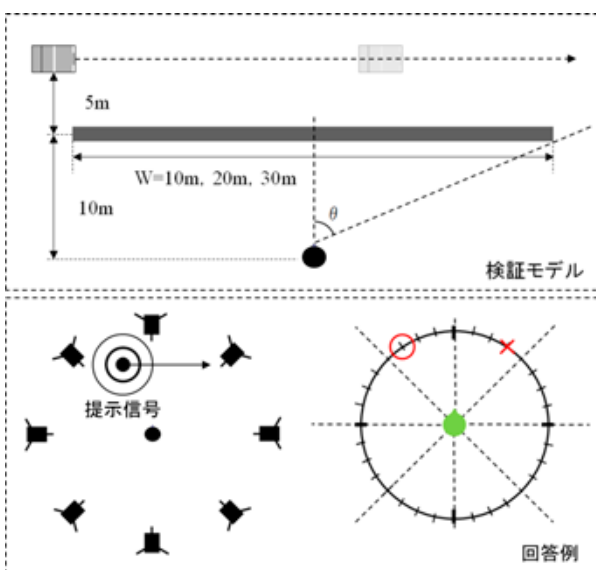


図-17 被験者実験の概要

とした。

図-17 に示す仮想空間内において、受音点から 10 m 離れた位置に高さを 5m、幅を 10、20、30 m とする 3 条件の防音壁を設定し、自動車の走行音を立体音響化した。ただし、今回は聴感上の再現性に関する実験であるため、スクリーンへの CG 投影は行なっていない。被験者には走行する自動車が防音壁の裏側を出たり入ったりする際の音の変化を手がかりに防音壁端部の位置 (音が大きく変化した地点がどの方向もあるのか) を回答させた。**図-17** に示すように 1 度の信号提示につき回答は、○：自動車が防音壁の裏側へ入った位置、×：自動車が防音壁の裏側から出た位置の 2 つである。VR 空間内の自動車の走行線と防音壁の位置関係は固定し、仮想空間内の被験者の頭部向きを 25° づつ変化させ、種々の方向から自動車が往来させた。この被験者実験の結果の例を **図-18**、**図-19** に示す。

図-18、**図-19** はそれぞれ天井 SP 配置および水平 SP 配置の場合の正答に対する回答結果を示したものである。図中の赤丸は回答○、緑丸は回答

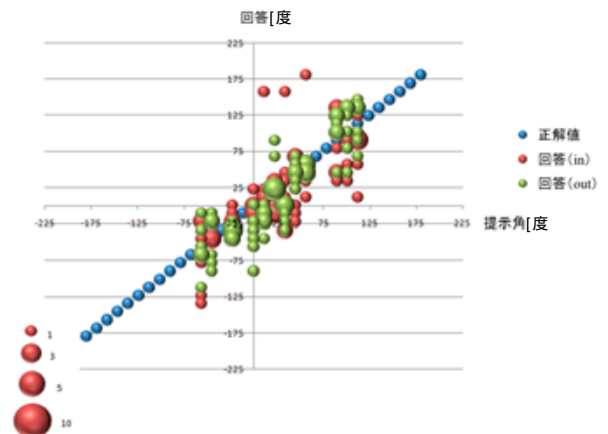


図-18 被験者実験の結果(天井 SP 配置の場合)

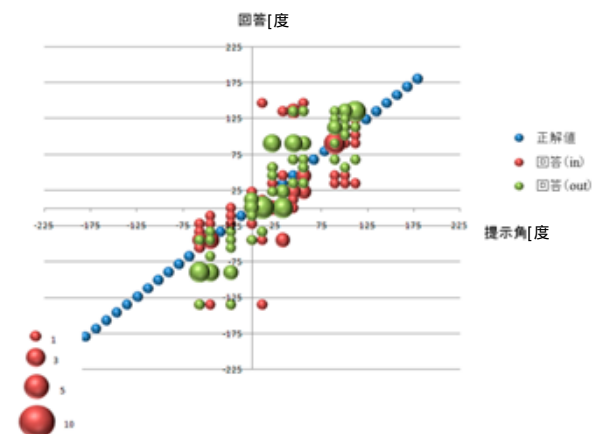


図-19 被験者実験の結果(水平 SP 配置の場合)

×を表し、丸の大きさは回答数の多さを示している。また正答を青丸で示す。被験者実験の結果とVR空間内における防音壁の見込み角度との誤差は平均で約 $\pm 10^\circ$ であった。一般に、両耳間の時間差、音圧差を手がかりとする音源定位の誤差は音源(純音)が正面にある場合は $\pm 5^\circ$ 、それ以外は $\pm 15^\circ$ 程度と言われる¹¹⁾。今回は広周波数域の自動車走行音を音源としているため、現時点では誤差の定量的な評価は難しいものの誤差範囲は一定範囲に収まっており、VR装置内であっても実用上十分な再現性を確保することは可能であると示唆される。

§8.おわりに

本論文では、VR技術とAmbisonicsを用いた立体音響技術による道路交通騒音評価システムについて述べた。道路環境や観測者位置の変化に応じて音響計算を行い、その結果をただちにVR空間に反映できる。高速な計算可能なASJモデルをベースとしつつ、立体音響化するための独自の計算法を導入した。その結果、音波の指向性や到達時間の遅れを

考慮することができ、より現実感の高い音響情報を提供することが可能となった。またVR装置内で再現される音場は、騒音レベル評価にも用いることができることを確認した。

今後は、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立体音響システムの構築を目指す。またVRによる視覚情報と立体音響による聴覚情報の双方を提示した場合の環境の再現性の検証を行う。

謝辞

没入型VR装置によるシステム開発、自動車走行音の実測、および被験者実験にあたり、貴重なご助言いただいた中央大学工学部榎山教授ならびに同研究室に感謝の意を表します。

<参考文献>

- 1) 小木哲朗, 茅原拓朗, 加藤允文, 浅山宏, 廣瀬通孝: 没入型多面ディスプレイのためのインタラクティブ高臨場感音場提示手法, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.8.1, pp.75-84, 2003.
- 2) 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.
- 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) 田近伸二, 榎山和男, 志村幸行: 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.
- 5) 柴田啓輔, 田近伸二, 榎山和男, 志村幸行: 可視化・可聴化技術を用いた道路交通騒音評価システムの構築, 土木情報利用技術講演集, 土木学会, Vol.36, pp.33-36, 2011.
- 6) 陰山聡, 佐藤哲也: VRシステムCompleXcope プログラミングガイド Research Report NIFS MEMO No.28, 1998.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) Malham, David G., and Anthony Myatt. "3-D sound spatialization using ambisonic techniques." Computer Music Journal, Vol.19.4, pp.58-70, 1995.
- 10) 前川純一, 阪上公博, 森本政之: 「建築・環境音響学」, pp.116-118, 共立出版, 2000.
- 11) 大山正, 今井省吾, 和氣典二編: 感覚・知覚ハンドブック, 誠信書房, 1994