

(8) 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

A Basic Study of 3-D Auralization on Evaluation System of Road Traffic Noise by using Virtual Reality Technology

谷川 将規¹・柴田 啓輔²・檜山 和男³

Masaki Tanigawa, Keisuke Shibata, and Kazuo Kashiya

抄録：本研究の目的は没入型 VR 装置による道路交通騒音評価システムの立体音響化手法の確立である。本手法では CG 映像に同期してリアルタイムに音響計算を行い、その結果を立体音響化して提示する。計算の高速化・効率化を図るため、エネルギーベースの音響計算法である ASJ RTN-MODEL 2008 を採用しており、防音壁など伝播障害物の影響、すなわち回折に伴う音波の到来方向、信号の到達時間の遅れ、周波数特性の変化等を反映することができる。本稿では、本手法で採用した音響計算モデルの概要と立体音響化の適用性について述べる。

キーワード：道路交通騒音、バーチャルリアリティ、立体音響、アンビソニックス

Keywords : road traffic noise, virtual reality, 3-D auralization, ambisonics

1. はじめに

近年の VR 技術の発達により、土木分野においても景観シミュレーションだけでなく物理現象の数値解析結果の 3 次元可視化など多くの適用事例が見られる。一方、音響分野では数値解析や縮尺模型実験の結果を音として再現する可聴化技術は古くから用いられ、室内外の音場評価などに用いられている¹⁾。

田近ら²⁾および柴田ら³⁾は没入型 VR システムに同期して交通騒音を提示する道路交通騒音評価シミュレーションシステムを構築した。このシステムは、日本音響学会の道路交通騒音予測モデル⁴⁾ (ASJ RTN-Model 2008, 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でき、多様な音場に適用可能である。エネルギーベースの計算手法である ASJ モデルは計算量が少なく扱いやすい反面、音波の到来方向(指向性)や到達時間の遅れ、周波数依存性のある回折減衰等は考慮されない。そのため、ASJ モデルのみで任意の音場を 3 次元的に再現(立体音響化)するのは難しい。

本研究の目的は、VR 技術を用いた交通騒音シミュレーション結果に基づいてより現実的な 3 次元音環境をリアル

タイムに再現することである。本研究では ASJ モデルをベースにしつつ、音波の指向性や到達時間の遅れ、周波数依存性を考慮できるよう音響計算モデルの改良を図った。本稿では防音壁等の伝播障害物による回折減衰に着目し、音響計算モデルの改良の概要とこれを組み込んだ VR システムの実装、およびその適用性を検討した結果を述べる。

2. 音響計算手法

図-1 に示すように、解析対象の音場である観測点 $\mathbf{r}$ 、単位強さの点音源 $\mathbf{r}_s$ 、伝播障害物 B がある。音源、伝播障害物は複数あっても良いが、ここでは議論を円滑に進めるため各々一つとする。観測点 $\mathbf{r}$ における音圧 $p(\mathbf{r}, k)$ を次式で与える。

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

ここに r は音源・観測点距離 ($= |\mathbf{r} - \mathbf{r}_s|$)、 k は波数 ($= 2\pi f/c_0$)、 f は周波数、 c_0 は音速である。一方、ASJ モデルに基づく距離減衰、拡散、回折減衰を考慮した音圧レベル SPL (単位: dB) は次式で計算される。

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

1:正会員 工博 清水建設(株) 技術研究所

(〒135-8530 江東区越中島 3-4-17, Tel:03-3820-6739, E-mail:tanigawa@shimz.co.jp)

2:正会員 中央大学 理工学研究科 土木工学専攻

3:正会員 中央大学 教授 理工学部 都市環境学科

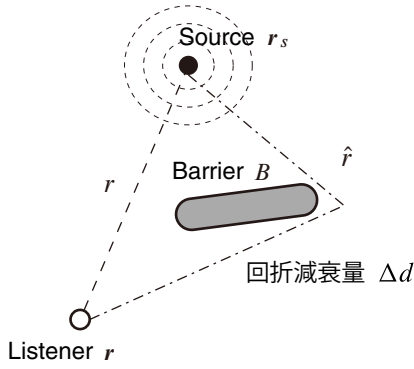


図-1 対象音場と記号定義

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 ($= 20 \times 10^{-6} \text{ Pa}$) である. 式 (1), (2) より次式を得る.

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

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 $PWL = 0 \text{ dB}$ 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 $\hat{r}$ の逆数で括り出した形である. 当然ながら, 観測点から音源が直接見通せる場合は $\hat{r} = r$, $\Delta d = 0$ であり, 回折の影響が及ぶ場合は $\hat{r} > r$, $\Delta d > 0$ である. ASJ モデルでは全周波数域に対して一つの回折減衰量を与える. 本研究ではこれに対し, 回折減衰の周波数依存性を考慮するように次に示す前川チャート⁵⁾の近似式により 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 ($= 2\delta f/c_0$), δ 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+, $N \geq 0$ ならば-を表す.

本システムでは, Ambisonics に基づく立体音響提示手法を採用する. ここでいう Ambisonics とは, 観測点に到来する音波を球面調和解析に基づいて方向別に分解し, 分解された音波を再生系 (スピーカの位置や数) に合わせて再構成して提示する手法である⁶⁾.

観測点から音源が直接見通せる等, 音波の到来方向が明らかな場合は Ambisonics は有効である. 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, 障害物端部からの回折音を考慮するなど音波の到来方向を別途定める必要がある.

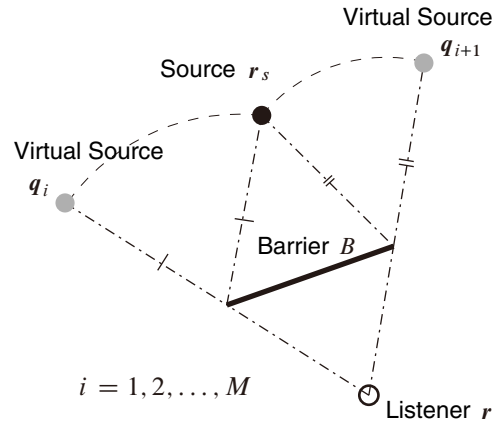


図-2 回折減衰計算のための仮想音源の設定

図-2 に示すように音波の回折がある場合, 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 q_i の位置は観測点を中心とする極座標系で $(\hat{r}, \theta, \phi)$ となる. 仮想音源 q_i から到来する音波は式 (1) より次式で表される.

$$p = Q e^{ik\hat{r}} / \hat{r} \quad (5)$$

$$Q = \{(\hat{r}/r)10^{-\Delta d/20}\} \quad (6)$$

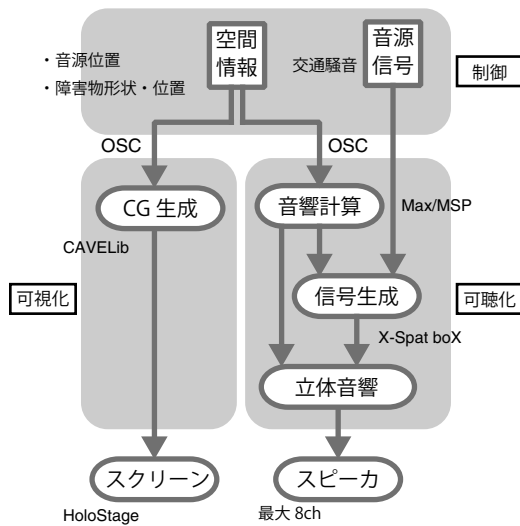
ここに Q は振幅の増幅率である. すなわち, 式 (5) は, 距離減衰を実際の行路長 $\hat{r}$ を用いて表し, 回折減衰を振幅の増幅率として考慮した形である. 当然ながら, 観測点での音圧は M 個の仮想音源からの寄与を合成して得られる.

なお, このモデルは音波の位相変化は考慮していない. これは, 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の判断に基づくものである.

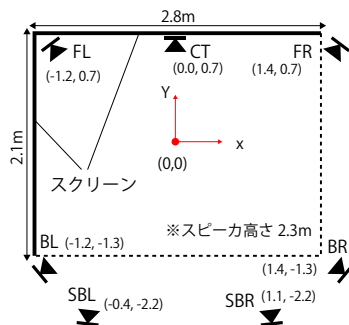
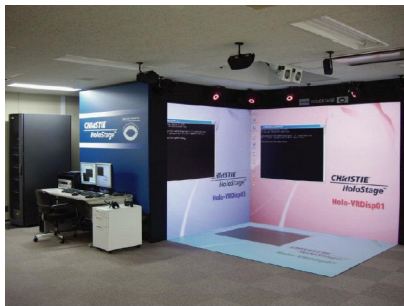
3. VR および立体音響システムの構成

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つのパートで構成される. 各部は独立しており, Open Sound Control プロトコルを用いた UDP/IP 通信により音源や伝播障害物位置等の空間情報や各減衰量等の音響情報を共有し, 画像と音響を同期して提示する.

可視化部は, 図-4 に示す3面の大型スクリーンを有する没入型 VR 装置 HoloStage (CHRISTIE 社) をデバイスとして, CAVELib (日本 SGI 社) を用いた自作のプログラムにより VR 空間を生成する. 可聴化部では音響プログラミングソフト Max/MSP (Cycling '74 社) 上で作成したプログラムを用いて前節で述べた音響計算を行い, 音源信号の振幅増幅率を計算する. 本システムでは可聴域 (20 ~ 20 kHz) を 1/1 ~ 1/12 オクターブバンド毎の増幅率に求めることができる. 次に, 音響計算結果と音源信号から



図－3 本システムの構成と処理の流れ

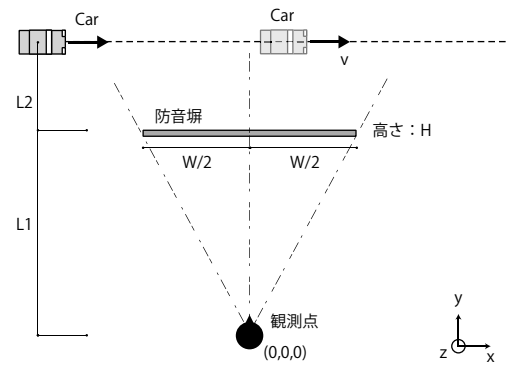


図－4 没入型 VR 装置とスピーカ配置 (単位: m)

Ambisonics に基づいて再生系に応じた信号を再構成する。CPU 負荷低減の観点から、今回は A & G 社の立体音響プロセッサ X-Spat boX を用いることとした。最大 8 つの音源信号に対して最大 8 チャンネルのスピーカの制御が可能である。今回は図－4 に示すように、VR 装置上部にある 7 つのスピーカを用いた。制御部もまた Max/MSP 上で作成されており、空間情報と音響情報の授受を制御する。

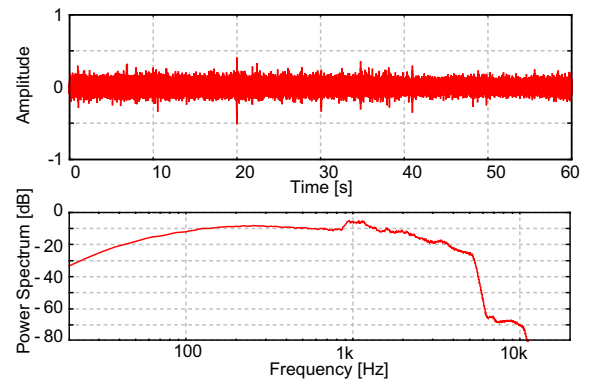
4. 適用性の検証

図－5 に示すような検証用モデルを考える。音源（自動車）は地盤面 $z = 0$ 上を x 方向に速度 v で移動する。また W 、高さ H の防音壁があるとする。ただし厚みは無視

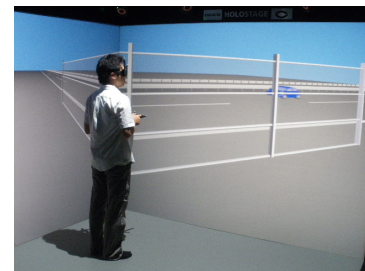


$v = 50 \text{ km/h}$, $W = 15, 20, 25, 30 \text{ m}$ (4 条件), $H = 3 \text{ m}$, $L_1 = 15 \text{ m}$, $L_2 = 5 \text{ m}$.

図－5 検証モデル



図－6 音源信号の波形とパワースペクトル

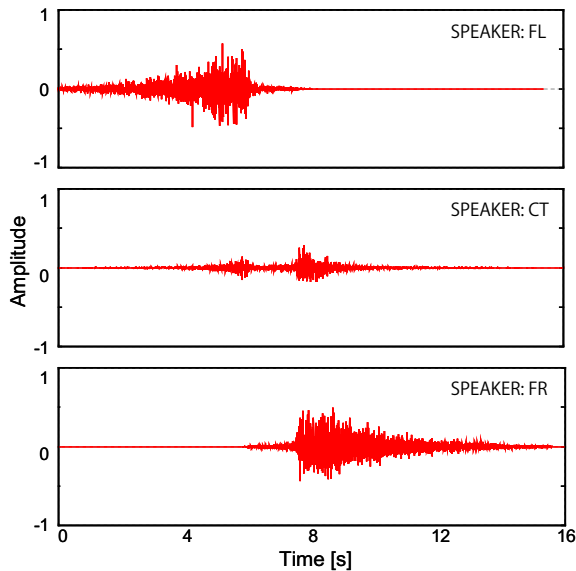


図－7 交通騒音シミュレーション状況

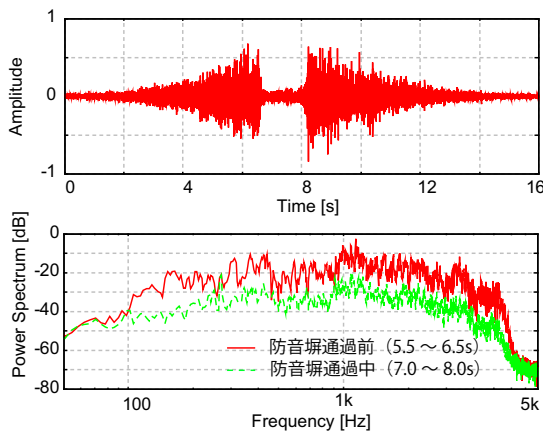
する。観測点から防音壁までの距離は L_1 、防音壁から音源までの最短距離は L_2 である。図－5 下段に実際に用いた値の一覧を示す。自動車が防音壁の陰にあるとき、回折音は防音壁の上方および側方から到来するとする。

図－6 は、音源信号として用いた自動車の定常走行音の波形とパワースペクトルを示す。これは自動車発生音の実測値から作成したものである。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上述の手法により VR 装置内で立体音響化した。その様子を図－7 に示す。

図－8 は、図－4 に示す VR 装置上部にある三つの前方スピーカ (FL, CT, FR) から自動車が防音壁に対して右から左へ走行する際に再生される信号を表す。これは防音壁の幅は 15 m、高さは 3 m の場合である。Ambisonics



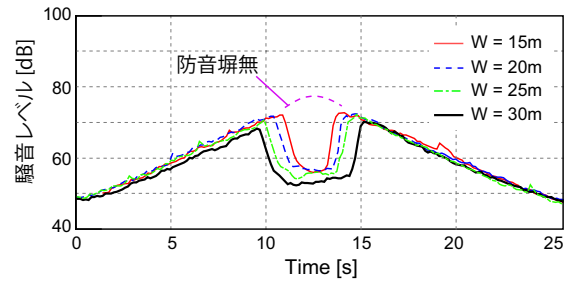
図－8 自動車通過時に前面スピーカから再生される信号



図－9 VR 装置中央における観測波形

により、自動車の移動に応じて各スピーカから再生される信号が変化する。まず自動車が近づく時には左前スピーカ (FL) からの再生音が卓越し、次に自動車が防音塀の陰になる時には正面スピーカ (CT) からも再生される。ただし回折減衰の影響で全体的に振幅は小さい。最後に自動車が去る際には右前スピーカ (FR) からの再生音が卓越する。

図－9 は、図－8 と同条件において VR 装置の中央位置 (高さ 1.5 m) で観測される音圧波形とパワースペクトルを表す。これはマイクロホンを用いて収録した結果、すなわち最大7つのスピーカからの再生音の合算値として得られたものである。VR 装置周辺は空調ノイズ等の暗騒音は存在するが、十分な SN 比を確保した上で計測を行った。図－9 上段から、自動車が防音塀の陰になる約 7.0～8.0 s の間は回折減衰の影響が見られる。また下段は防音塀の影響を受ける／受けない場合のパワースペクトルを表す。約



図－10 VR 装置中央における騒音レベル計測結果

100 Hz以上の周波数で減衰の影響が大きいことがわかる。

図－10 は、防音塀幅 W を 15～30 m の 4 条件とした場合の 0.1 s 毎の 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。図－10 から、防音塀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－10 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るが、計測結果から求めた回折減衰量と ASJ モデル計算値との差は最大で ± 2 dB の範囲にあり、交通騒音の評価は十分可能であると判断される。

5. おわりに

没入型 VR 装置を用いた道路交通騒音評価システムの立体音響化に関して、ベースとなる ASJ モデルを改良した音響計算モデルを用いることによって、CG に同期して交通騒音を立体音響化することが可能であることを示した。今後、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。

参考文献

- 1) 坂本慎一：音場の可視化・可聴化技術の現状および将来展望，日本音響学会誌，Vol.61，pp.45-49，2005 年
- 2) 田近伸二，樫山和男，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，Vol.13，pp.231-239，2010 年
- 3) 柴田啓輔，田近伸二，樫山和男，志村正幸：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，Vol.35，pp.25-28，2010 年
- 4) 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 年
- 5) 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 年 9 月
- 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