

(32) VR技術を用いた体験型航空機騒音 評価システムの構築

石田 安理¹・山本 恭平²・吉町 徹³・榎山 和男⁴・志村 正幸⁵

¹学生会員 中央大学大学院 理工学研究科都市環境学専攻 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)
E-mail: ishida@civil.chuo-u.ac.jp

²非会員 株式会社三井住友建設 東北支店 (〒980-8608 仙台市青葉区花京院 2-1-14)
E-mail: kyo-yamamoto@smcon.co.jp

³正会員 株式会社 JSOL エンジニアリングビジネス事業部 (〒104-0053 東京都中央区晴海 2-5-24)
E-mail: yoshimachi@civil.chuo-u.ac.jp

⁴正会員 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)
E-mail: kaz@civil.chuo-u.ac.jp

⁵正会員 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)
E-mail: shimura@kensetsukankyo.co.jp

本論文は、VR(バーチャルリアリティ)技術を用いた幾何音響理論に基づく航空機騒音予測システムの構築を行ったものである。本システムは、VR空間内の利用者の位置情報を用いてVR空間内においてリアルタイムに騒音レベルを算出し、航空機の飛行CG映像とともに騒音レベルを実際の音源データを用いて可聴化することで、航空機騒音を視覚と聴覚の両面から体験可能なシステムである。数値解析例として、屋内外での騒音シミュレーションを行い、VR空間内において計算結果と測定結果の比較を行った。

Key Words: virtual reality, geometrical acoustics, aircraft noise, indoor noise simulation

1. はじめに

わが国の空港周辺では、航空機騒音問題は大きな社会問題として益々深刻化している。近年の計算機の向上に伴い、これらの騒音レベルを把握するために、幾何音響理論や波動音響理論に基づく数値シミュレーションが数多く行われている。いずれの方法においても、計算結果の騒音レベルの提示は、等値線や等値面を用いた可視化により行われるのが一般的である。しかし、CGによる可視化は騒音の影響範囲の把握には有効であるが、実際に人間の耳にする聴覚情報の提示が行われないうえ、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。そこで、既往の研究として著者らは近年発展・普及の著しいVR技術を用いて計算結果をリアルタイムに聴覚情報として提示する道路交通騒音評価システム¹⁾を基に航空機騒音予測システム²⁾³⁾の構築を行ってきた。VR技術の適用はこれまで専門家以外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現象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、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。

そこで本研究では、既往の幾何音響理論に基づく航空機騒音予測システムに対して、住宅地における航空

機の屋内外での騒音シミュレーションを可能とするために屋内騒音レベル評価式の実装を行った。数値解析例として、東京国際空港を対象とした騒音シミュレーションに適用し、屋内外での騒音レベルの計算結果を可聴化するとともに、VR空間内において計算結果と測定結果との比較を行った。

2. 航空機騒音予測システム

(1) VR環境

本研究で用いる没入型VR装置HoloStage(図-1)は前面と側面及び底面の3面の大型スクリーンとそれぞれに対応した高性能プロジェクター、またVR空間内の装置の利用者の動きを捉えるためのワイヤレス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ている。VR空間の構築及びCG映像の作成にはCAVELibおよびOpenGLを用いており、可聴化には音響用プログラミングソフトであるMaxにより作成した独自のソフトウェアを用いている。

(2) システム概要

図-2に本システムの処理工程を示す。プログラミング言語としてはC++を用い、CG描画はOpenGLにより行われており、音響ソフトMaxを用いることで立体



図-1 没入型 VR 装置 HoloStage

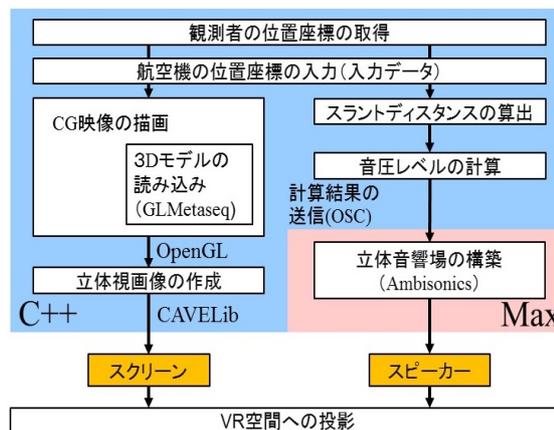


図-2 処理工程

音響とCG映像の同期を行っている。また、利用者の視点からの立体映像の生成、スクリーン間の映像の同期、コントローラの操作など没入型VR環境を構築するためにCAVELibを使用している。なお、本システムでは航空機および観測地点の周辺環境は、C++用のライブラリ「GLMetaseq」⁵⁾⁶⁾を用いることにより自作の3Dモデルを直接投影することで再現している。また立体音響場の構築には球面調和関数展開法に基づくAmbisonics⁷⁾手法を用いている。

(3) 音響計算

わが国では従来、航空機騒音の予測にはWECPNL(加重等価継続感覚騒音レベル)⁸⁾や L_{den} (時間帯補正等価騒音レベル)⁹⁾などの評価量が用いられてきた。しかし、これらの予測式はそれぞれ、航空機の最大騒音レベルの平均をもとに評価値を算出するものや時間帯別の重み付けをした等価騒音レベルを求めるものであるため、本システムで必要とする非定常の音圧レベルの算出には適さない。

そこで本研究では、騒音レベルの時間的変化が算定できるように、実測データを用いた幾何音響理論に基づく計算式を使用した。具体的には、航空機の音響パワーレベル L_W は、空気吸収や地表面減衰などの超過減衰は考慮せず、点音源の半自由音場での距離減衰式を用いた次の式(1)より求めた⁴⁾。既往の研究²⁾では自由音場における式を用いていたが、本研究では離陸直後を想定しているため、半自由音場の式としている。

$$L_W = \overline{L_{PA}} + 20\log_{10}SD + 8 \quad (1)$$

ここで、 $\overline{L_{PA}}$ はエネルギー平均値、 SD はスラントディスタンス(m)である。

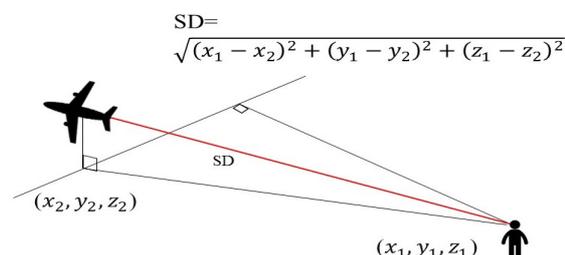


図-3 スラントディスタンス(SD)の求め方

a) 屋外における音響計算

屋外でのシミュレーションのために使用した式は次式(2)である。

$$L_P = L_W - 20\log_{10}SD - 8 + \Delta L_{cor} \quad (2)$$

ここで、 L_P は利用者位置での音圧レベル、 ΔL_{cor} は指向性や空気吸収の補正項であるが、本研究ではこれらの影響は無視している。なお、エネルギー平均値 $\overline{L_{PA}}$ として、実測値と比較する際は観測点へ向かって離陸する1分間の騒音レベルのうち暗騒音の影響を考慮したオールパス値を使用する予定であるが、のちに示す屋内騒音シミュレーションでは参考文献(4)を参照した141dBを使用している。

上式により、その時々々の音圧レベルはスラントディスタンスのみに依存するので、利用者がVR空間内を自由に移動した場合でもその場所での騒音をリアルタイムに体験することができる。またスラントディスタンス SD については、航空機の x,y,z 座標および利用者の x,y,z 座標より三平方の定理で算出している(図-3)。

b) 屋内における音響計算

屋内の利用者位置における騒音レベル(SPL)は屋外騒音レベル(L_P)に補正項を加えた以下の式により

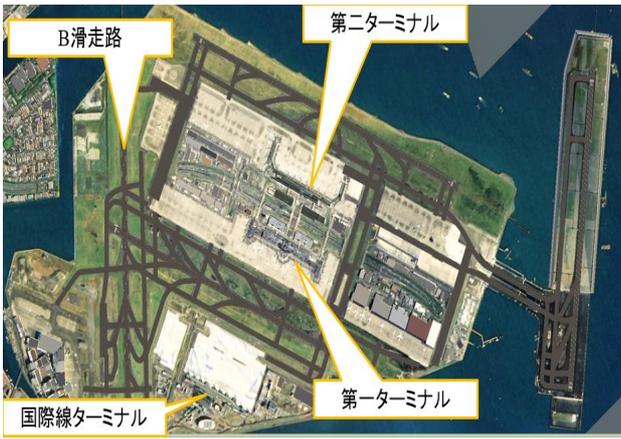


図-4 東京国際空港モデル

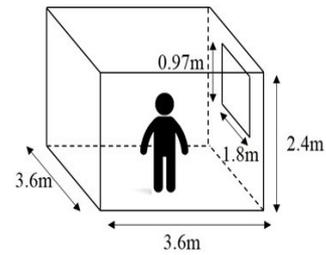


図-5 建物モデル

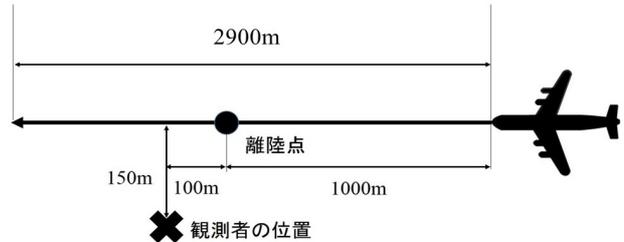


図-6 利用者と航空機の位置関係

算出している¹⁰⁾。

$$SPL = L_P - TL - 10 \log_{10} \frac{A}{S_{sum}} + 3 \quad (3)$$

ここで、 TL は透過損失、 A は全吸音力、 S_{sum} は透過する面の総面積である。建物内の透過損失の算出には壁と窓の透過損失を考慮できる総合透過損失を、用いる材料の透過損失はすべての周波数帯域の透過損失を平均化したものを用いている¹¹⁾。

3. 適用例

本研究では、図-4 に示す東京国際空港周辺をモデル化した建物内外における航空機騒音シミュレーションを行い、可聴化した。屋内シミュレーションについては一重窓と二重窓の二通りを検証した。本システムはコントローラの操作により VR 空間内の任意の位置に建物モデルを投影することができ、また一重窓と二重窓の切り替えも可能となっており、それぞれに対応した音響計算をリアルタイムに行うことができる。計算結果と VR 空間内での測定結果の比較を行った。

屋内シミュレーションに使用した建物モデルは図-5 に示すように奥行 3.6 m、横 3.6 m、高さ 3 m の建物である。また側方 4 面と天井の計 5 面とし、全吸音力は使われている材料の吸音率にその面積を乗じて求め、透過する面の総面積は上記の 5 面の面積を用いる。窓ガラスについては、一重窓（面積：1.746 m²、厚さ：3 mm、透過損失：25 dB）と二重窓（面積：1.746 m²、厚さ：3 mm・6 mm のガラスの間に 50 mm の空気層の計 59 mm、透過損失：33 dB）の二種類とした。

図-6 に利用者と航空機の位置関係を示す。航空機は B 滑走路を滑走し、東から西へ離陸すると仮定した。図-7、図-8 に屋外および屋内でのシミュレーションを体験している様子を示す。



図-7 システムを体験している様子（屋外）



図-8 システムを体験している様子（屋内）

VR 空間内での測定は、図-9 に示す床面スクリーンの原点の高さ 1.5 m の位置に騒音計を設置して行った。計算結果と測定結果の比較を図-10 に示す。各条件において計算結果と測定値は良い一致を示している。二重

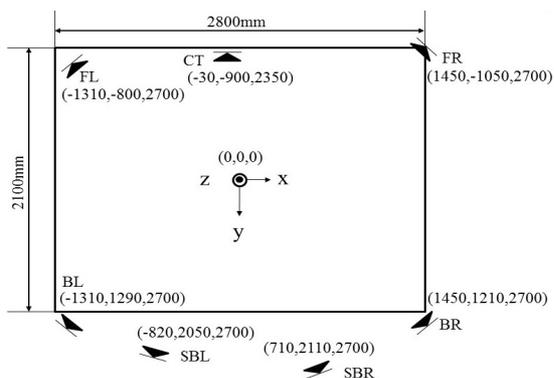


図-9 騒音計の設置位置

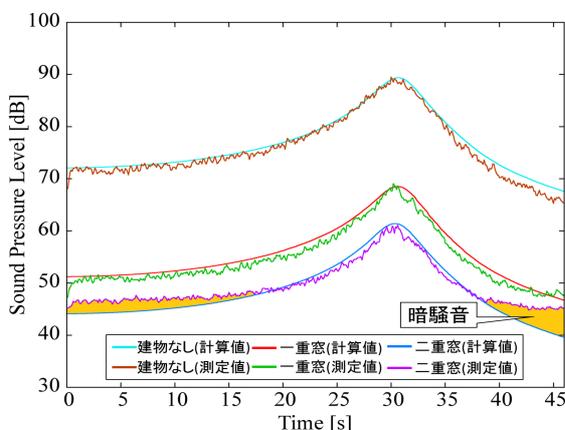


図-10 計算結果と測定結果の比較

窓の場合における計算結果との差異は、二重窓による騒音レベルの低減により暗騒音の影響が大きく現れたためである。また、各周波数帯域の透過損失を平均化したものを用いているため騒音の低減効果のみが体験可能となっているが、今後は周波数分析も視野に入れ、壁などの材質の変更による音色の変化なども体験できるようにする必要がある。

4. システムの高精度化に向けた検討

現在システムの高精度化のために音源の指向性や各種減衰効果¹²⁾の検討を行っている。航空機騒音の場合には、騒音の影響範囲が数 km 先に及ぶこともあるため、航空機と受音点の距離が離れるほど距離減衰だけでなく、空気吸収や地表面減衰などの過剰減衰量や音源の指向性を考慮することが必要とされている。検討結果については、講演時に述べる。

5. おわりに

本論文では、既往の幾何音響理論に基づく航空機騒音予測システムに、住宅地における屋内外での航空機の騒音シミュレーションを実現するために屋内騒音レベル評価式の実装を行った。本システムを東京国際空港を対象として騒音シミュレーションに適用し、VR空間内において計算結果と測定結果との比較を行い以下の結論を得た。

- VR空間内において、ほぼ計算結果通りの可聴化結果を提示することが可能となった。
- 屋内騒音評価式を適用しシミュレーションを行うことで、建物内外及び一重窓・二重窓による騒音の低減効果を確認できた。

今後の課題として、指向性や各種減衰量の導入などが挙げられる。

参考文献

- 1) 田近伸二, 櫻山和男, 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.
- 2) 石田安理, 吉町徹, 櫻山和男, 志村正幸, 坂崎友美: VR 技術を用いた幾何音響理論に基づく航空機騒音予測システムの構築, 土木情報学シンポジウム講演集, 土木学会, Vol.40, pp.243-246, 2015.
- 3) 山本恭平, 吉町徹, 石田安理, 櫻山和男, 志村正幸: VR 技術を用いた航空機騒音評価システムの構築, 第 43 回土木学会関東支部技術研究発表会, 2016.
- 4) 成田市空港部空港対策課:平成 25 年度 成田国際空港周辺航空機騒音測定結果 (年報), <<http://www.city.narita.chiba.jp/sisei/sosiki/kutai/houkoukusho25.html>>, (入手 2015.5.2).
- 5) 橋本直:工学ナビ ARToolKit を使った拡張現実感プログラミング, <<http://kougaku-navi.net/ARToolKit/>>, (入手 2015.5.2).
- 6) Akira Kageyama, Youhei Masada: Applications and a three-dimensional desktop environment for an immersive virtual reality system, *Journal of Physics: Conference Series*, Vol.454, 2013.
- 7) Darren B Ward and Thushara D Abhayapala: Reproduction of a Plane-Wave Sound Field Using an Array of Loudspeakers, *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing* Vol.9 No.6, Sept 2001.
- 8) 木村翔・井上勝夫:航空機騒音の予測手法について, 騒音制御, 日本騒音制御工学会, Vol.4[No.2], pp.71-78, 1980.
- 9) 環境省:航空機騒音測定・評価マニュアル, 2014.
- 10) 実務的騒音対策指針 (第 2 版), pp.24-25, 技報堂出版, 日本建築学会, 1994.
- 11) 木村翔:建築音響と騒音防止計画, 影国社, pp.77-79, 1994.
- 12) 篠原直明, 月岡秀文, 吉岡序, 山田一郎:航空機騒音の予測における地面の過剰減衰と気象の影響, 振動・音響新技術シンポジウム講演論文集, 日本機械学会, 2001-06-05, pp.183-186, 2001.