VR 技術を用いた体験型航空機騒音予測システムの構築

中央大学大学院　学生員　○ 石田　安理
中央大学　正会員　樫山　和男
建設環境研究所　正会員　志村　正幸
建設環境研究所　正会員　坂崎　友美

1. はじめに

近年わが国の空港周辺では航空機騒音は大きな社会問題として益々深刻化している．これらの騒音の影響を把握するために，著者らによって近年発展・普及の著しい VR 技術を用いて幾何音響理論に基づき計算された計算結果を聴覚情報として提示する道路交通騒音評価システム[1)]を基にした航空機騒音予測システム[2) 3)]の構築がされてきた．本システムの構築は，空港近辺の家屋の屋内における騒音シミュレーションを適用し，防音対策の効果について検討を行う事を目的としている．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．

そこで本研究では本システムの適用性の向上とし，幾何音響理論に基づく屋内外での騒音予測式を実装するとともに，算出した計算値と実測値の比較を行い，過剰減衰量について検討を行った．

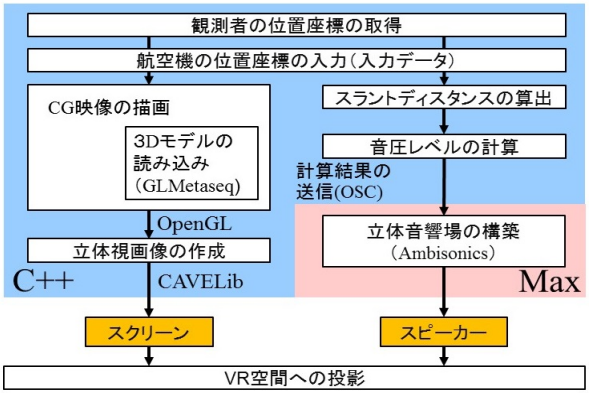
2. 航空機騒音予測システム

(1) VR 環境

本研究で用いる没入型 VR 装置 Holostage 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－１に本システムの処理工程を示す．その他本システムの詳細に関しては参考文献 1)2)3) を参照されたい．



図－１　処理工程

(3) 音響計算

a) 屋外での騒音シミュレーション

本研究では騒音レベルの時間的変化をリアルタイムに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[4)]使用している．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距離減衰を考慮した次の式 (1) より求めた．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の騒音レベルを対象とするため，半自由音場の式としている．

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

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．スラントディスタンスとは航空機と受音点の直線距離のことであり，航空機及び利用者の座標より三平方の定理で算出している．エネルギー平均値 $\overline{L_{PA}}$ については，観測点へ向かって離陸する航空機の 1 分間の騒音レベルのうち，暗騒音の影響を考慮し 80dB 以上のオールパス値を用いた．VR 装置へ実装する際に使用した式は次式 (2) である．

$$L_P = 158.0 - 20\log_{10}SD - 8 + \Delta L_{cor} \qquad (2)$$

ここで，L_P は音圧レベル，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．上式により，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 CG 映像とともにリアルタイムに体験することができる．

b) 屋内での騒音シミュレーション機能

本システムでは，任意の場所において建物モデルを置き，その室内における騒音シミュレーションの結果も体験可能となっている．屋内における騒音レベル（SPL）は屋外騒音レベル（SPL_0）に補正項を加えた以下の式により算出している．

$$SPL = SPL_0 - TL - 10\log_{10}\frac{A}{S_{sum}} + 3 \qquad (3)$$

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を示している．

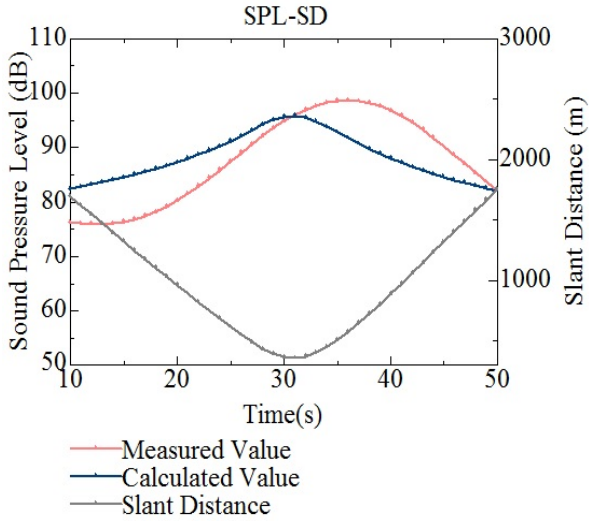
建物内の透過損失の算出には壁と窓の透過損失を考慮できる総合透過損失を用いており，用いる材料の透過損失はすべての周波数帯域の透過損失を平均化したものを用いている[5)]．建物のモデルは，側方 4 面と天井の計 5 面とし．全吸音力は使われている材料の吸音率にその面積を乗じて求め，透過する面の総面積は上記の 5 面の面積を用いる．室内騒音シミュレーションの結果については当日提示する．

KeyWords：　バーチャルリアリティ，航空機騒音，幾何音響理論
連絡先：　〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27　E-mail: ishida@civil.chuo-u.ac.jp

3. 適用例について

(1) 概要

本研究では適用例として，東京国際空港 (羽田空港)C 滑走路から内陸方面へ向かって離陸した航空機の様子を再現した．騒音レベルおよび航空機の位置座標のデータは，城南島海浜公園内において計測した際に得たデータを用いた．なお，航空機の機種は Boeing737-800 である．スラントディスタンスに関しては，実測の 10 機分の座標の平均値を用いて利用者との位置から算出している．**図－２**に，音圧レベルとスラントディスタンスの関係を実測値及び計算値において比較したものを示す．実測値において周辺からの騒音の影響が考えられる範囲を除外して示している．なお，実測値に関しては最小二乗法近似を施している．計算値ではスラントディスタンスが最小となる時点と音圧レベルが最大になる時点が一致するが，実測値では音圧レベルぼピークが後ろにずれていることがわかる．これは，航空機のジェットエンジンからの騒音が斜め後方に指向性を持つことが主要因として考えられる．



図－２ 音圧レベルとスラントディスタンスの関係

(2) 過剰減衰の考慮

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の影響を考慮しなければならなくなる．本研究ではまず仰角により求められる地表面減衰 (Excess Ground Attenuation) [6] を考慮し，過剰減衰量を求め，実測値との比較を行った．また，仰角とは航空機の位置と観測者の位置とがなす角度のことである．

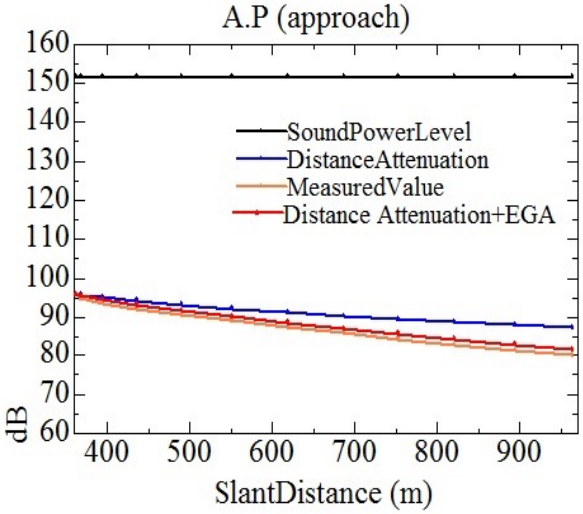
$$G(l) = 15.09(1 - \mathrm{e}^{-0.00274l}), for\ 0 \le 914m \quad (4)$$

$$G(l) = 13.86, for\ l \ge 914m \quad (5)$$

$$G(\beta) = 3.96 - 0.66\beta + 9.9\mathrm{e}^{-0.13\beta}, for\ 0° \le \beta \le 60° \quad (6)$$

$$G(\beta) = 0, for\ \beta \ge 60° \quad (7)$$

$$G(\beta, l) = \frac{G(l)G(\beta)}{13.86} \quad (8)$$



図－３ 実測値と計算値の比較

ここで，l は航空機と観測者の水平距離，β は仰角であり，式（8）は距離に依存する項と仰角に依存する項との積により表現された評価式である．これらの式を用いて導出した地表面による過剰減衰量を考慮した計算値と実測値の比較（航空機接近時）を**図－３**に示す．図より，地表面減衰を考慮することにより計算値が実測値と良い一致を示していることがわかる．空気吸収量についてはまだ考慮していないため，今後の課題とする．

4. おわりに

本論文では，幾何音響理論に基づく屋内外での騒音予測式を実装するとともに，算出した計算値と実測値の比較を行い，過剰減衰量について検討を行い以下の結論を得た．

- 室内における航空機騒音の体験が可能となった．
- 地表面減衰を考慮することにより実測値との比較において計算結果でのその効果を確認できた．

今後の課題として，音の指向性や周波数別に空気吸収を考慮したシミュレーションを行うことなどが挙げられる．

参考文献

1) 谷川将規・江嶋孝・樫山和男・志村正幸:混合交通を考慮した VR 技術に基づく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.70,No.2,pp.195-202,2014.
2) 石田安理，吉町徹，樫山和男，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，樫山和男，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/houkokusho25.html>
5) 木村翔：建築音響と騒音防止計画，影国社，1994.
6) 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.