

窓の遮音性能に関する簡易可聴化システムの開発

03-240064 川上 舞

1. はじめに

現在、窓の性能は JIS 規格の遮音等級 (T 値) や音響透過損失などの数値で示されているが、これらは専門的な指標であり、一般の購入者が数値だけを見て「実際の部屋でどう聞こえるか」具体的にイメージすることは困難である。

こうした課題に対し、三浦ら[1]は等級ごとの音を事前に作成して提示する体験システムを提案している。しかし、この手法はあらかじめ用意された音源を再生する仕組みであるため、窓面積や室容積といった現場ごとの多様な環境条件の変化に即座に対応できない点が課題であった。

そこで本研究では、現場でパラメータを変更し、即座にシミュレーション音声を生成する「簡易可聴化システム」を構築する。これにより、数値だけでは伝わりにくい遮音性能を「聴く体験」として提供し、購入者が性能の違いを直感的に理解することが可能になる。また将来的には、検討したい現場の騒音をその場で録音してシミュレーションするなど、より実用的な展開も視野に入れている。

2. 可聴化システムの構築

2.1 システムの概要

本システムは、収録した外部騒音に対し、窓の透過損失、窓面積、室内の吸音特性を考慮した信号処理を行い、ヘッドホン受聴により、受音点における音色や音量感を再現するものである。MATLAB App Designer を用いて、GUI 上で各種条件を変更可能なシミュレータを開発する。

2.2 音源の収録と校正

(1) マイクロホンの選定と録音環境

外部騒音の収録にあたり、全指向性マイク (RION NL-42A) と単一指向性マイク (RODE M5) の比較検討を行った。同一の外部騒音を同時録音して比較した結果、マイクの指向性によって騒音の立ち上がり感や風雑音の影響などに聴感上の差異が確認された。本研究では、収録音を全方位から安定して捉えることができ、かつ今回の収録においてノイズの影響が比較的少なかった全指向性マイクのデータを採用することとした。

録音は、以下の 5 地点において、マイク高さを地上 1.5m に設定して実施した (図 1)。

1. 道路交通騒音 (近距離) : 国道 1 号線の歩道
2. 道路交通騒音 (高所) : 国道 1 号線の歩道橋上 (地上約 3 階の高さ)
3. 鉄道騒音 (在来線) : 横須賀線沿いの線路脇
4. 鉄道騒音 (新幹線) : 東海道新幹線沿いの線路脇
5. 航空機騒音 : 城南島海浜公園 (羽田空港滑走路より約 1.5km)



図 1 録音の様子

(2) 録音レベルの校正

収録された音声データの振幅レベルと、測定現場における音圧レベル (SPL) を対応付けるため、半無響実験室にて基準音源 (ピンクノイズ) を用いた校正を行った。校正後の騒音レベルを表 1 に示す。

表 1 各音源の騒音レベル

	道路交通騒音		鉄道騒音		航空機騒音
	歩道橋上	車道横	新幹線	在来線	
①騒音計[dB(A)]	68.64	73.92	77.55	88.75	64.13
②マイク[dB(A)]	68.5	73.25	75.58	87.88	64.24

2.3 信号処理アルゴリズム

室内における受音レベル $L_{in}(f)$ について、屋外の騒音レベル $L_{out}(f)$ を用いて次式 (1) でモデル化した。

$$L_{in}(f) = L_{out}(f) - R(f) + 10 \log_{10} S_w - 10 \log_{10} A(f) \quad (1)$$

ここで、 $R(f)$ は窓の透過損失、 S_w は窓面積 [m^2]、 $A(f)$ は室内の等価吸音面積 [m^2] である。なお、本研究ではランダム入射条件を仮定しているため、特定の入射角 θ に依存する補正項 ($+10 \log \cos \theta$ 等) は考慮しなかった。

このシステムのフローは図 2 の通りであり、入力信号を 1/3 オクターブバンドごとのバンドパスフィルタで帯域分割した後、各バンドにおいて、透過損失 $R(f)$ および室内吸音力 $A(f)$ による「周波数特性の調整 (フィルタ処理)」と、窓面積 S_w による「音圧レベル調整 (ゲイン処理)」を適用し、最後に合成して出力する構成とした。これにより、各パラメータの独立した変更と実時間処理を実現している。

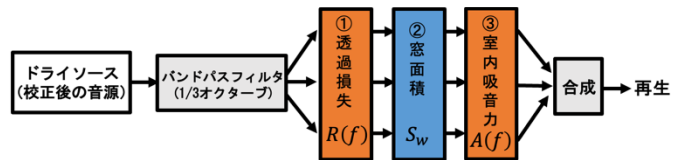


図 2 可聴化システムのフロー

2.4 シミュレーション条件の設定

本システムでは、ユーザーがシミュレーション条件として以下の 4 種類のパラメータを任意に設定・変更可能である。

(1) 窓の仕様 (種類・寸法)

1. 種類
板硝子協会発行のデータに基づき、単板ガラス (FL3 等)、複層ガラス、合わせガラス、二重サッシなど 60 種類以上の透過損失データをデータベース化し、ドロップダウンリストから選択可能とした。また、ユーザーが任意の透過損失データを Excel ファイルに追記することで、新規ガラスのデータをシステムに即座に反映・追加可能な拡張性を持たせた。

2. 寸法
幅と高さを数値入力することで面積 S_w を算出し、式 (1) を通じて受音レベルへリアルタイムに反映される仕様とした。

(2) 室内の音響条件（広さ・吸音率）

受音室の空間条件として、以下の「室の広さ」と「室内の吸音率」の組み合わせを選択可能とした。

1. 広さ

一般的な日本の住宅事情を考慮し、天井高を標準的な $H=2.4\text{m}$ に固定した上で、床面積を「6 畳」「12 畳」「24 畳」の 3 パターンから選択可能とした。

2. 吸音率

家具の占有率や内装の違いを反映した「低吸音」「中吸音」「高吸音」の 3 段階を設定した。各条件の室平均吸音率 $\bar{\alpha}$ は、日本建築学会編『建築音響設計資料集成』[2] に記載された内装材の吸音率 α_i および家具等の等価吸音面積 A_k を用い、次式に基づいて算出した値を適用している。

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum(\alpha_i S_i) + \sum A_k}{S_{total}}$$

この計算において、吸音率は単なる定数ではなく周波数ごとの特性を持たせている。例えば「高吸音」条件では、ベッドやソファなどの多孔質吸音体による等価吸音面積を加えることで、高音域において吸音率が顕著に上昇する実居室特有の周波数特性を再現している。

2.5 実装と再生環境の校正

開発したアプリケーションの GUI を図 3 に示す。本アルゴリズムの処理時間は平均 89.78ms であり、パラメータ変更に対する遅延を感じさせない動作を実現した。

また、再生環境（ヘッドホン等）の特性による音量差を補正するため、システム起動時に「音量調整画面」が現れるようにした。基準音源（近距離の道路交通騒音）を再生し、ユーザーが聴感を用いて出力レベルを調整することで、絶対音量の再現性を担保している。



図 3 アプリケーションの GUI

3. システムの検証

3.1 物理特性の検証

構築した信号処理アルゴリズムの妥当性を検証するため、入力信号にホワイトノイズを用いた際の入出力特性の分析を行った。図 4 に、単板ガラス (FL3) 条件における、計算上の透過損失（入力と出力のスペクトル差分）と、カタログスペック値の比較を示す。

解析の結果、シミュレータの出力特性は理論値と高い精度で一致しており、バンドパスフィルタによる周波数ごとの減衰処理および合成処理が、システムとして正しく実装されていることが確認された。

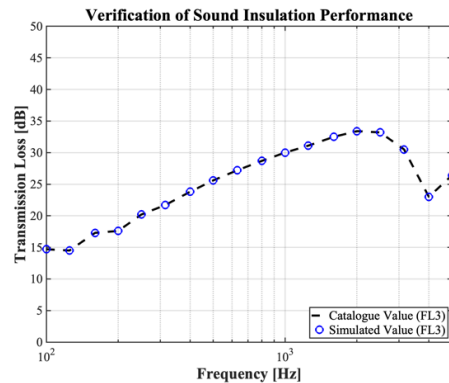


図 4 システムの物理特性検証結果

3.2 聴感による検証

開発したシステムを用い、同一の騒音（在来線の鉄道騒音）に対して「単板ガラス (T-1 等級)」と「二重窓 (T-4 等級)」と「窓解放時」の条件で比較聴感を行った。

技術的な検証として、バンド合成時の位相干渉による異音やノイズが生じていないことを確認した。その上で聴感印象を確認したところ、単板ガラスに比べて二重窓の時のほうが、音量が小さくなるだけでなく低音域の騒音感が残る「こもり感」が増し、また、窓開放時には外部の音が直接入ってくるような開放感が明瞭に再現された。これにより、数値だけでは伝わりにくい遮音性能の違いを、リアリティを持って提示可能であることが示唆された。

4. まとめ

本研究では、窓の遮音性能を直感的に把握するための実時間可聴化システムを構築した。数式モデルに基づきフィルタ処理を行う手法を採用することで、現場での録音データを用いた実時間シミュレーションへの応用可能性を示した。

今後の課題として、録音マイクの種類（全指向性・単一指向性）による聴感上の再現性の違いに関する検証や、音の入射角度依存性を考慮したより厳密な音響モデルの実装が挙げられる。

参考文献

- [1] 三浦啓祐, 他: 窓の遮音性能体感学習システムに関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2021
- [2] 日本建築学会編: 建築音響設計資料集成, 技報堂出版