

論文の内容の要旨

論文題目：壁面音響乱反射率の実験室測定と数値解析に関する研究

(Laboratory Measurement and Numerical Analysis of Acoustic Scattering Coefficients for Wall Surfaces)

氏 名：李 孝振

本研究は、壁面音響乱反射率の汎用的な定量化手法の構築・整備、及び実験室測定と数値解析を通して乱反射率の挙動を把握し、測定条件、測定における誤差要因等に関する知見を得ると共に、各種壁面拡散体の乱反射率特性を把握することを目的として行われた。

第1章では、研究の背景及び既往関連研究の概観を行った上で、本研究の目的について述べた。

建築・都市空間における音響設計の重要性、壁面で反射される音波の散乱性状、即ち拡散性が室内音響特性に及ぼす影響について述べた上で、その問題点、壁面による音響拡散を考慮した音響設計の有効性について指摘した。また、壁面の音響拡散性能の評価指標を確立することも音響設計上有意義であることを述べた後に、音響乱反射率の定義、算出法や既往関連研究について概観し、本研究の位置づけを行った。

第2章では、ランダム入射乱反射率の測定法について、試料の適用条件や測定における誤差要因等、測定条件を明らかにするための検討を縮尺及び実大測定を通して行い、測定法の汎用性を向上させるための様々な知見を得た。

はじめに残響室法の測定原理について述べ、これに基づく ISO 17497-1 の測定方法及び留意点について具体的に述べた。次に、模型残響室における縮尺及びインパルス応答測定に関する基礎的な検討を行い、他機関の測定結果との比較により本測定システムの妥当性を検証した。

その後、縮尺模型残響室を用いた測定を通して、試料の端部処理や配置等の試料適用範囲に関する検討を行った。測定試料を円形に切り取った場合に、試料端部の凹凸により過大に測定されていた乱反射率を、基準円盤に枠を取り付けることで抑制できることを示した。枠の高さは試料高さ以上必要であり、枠の厚さによる影響は小さいことが確認された。また、試料の配置による影響は僅かであり、

試料の切り出し位置は測定上殆ど問題にならないことが示唆された。

最後に、インパルス応答の測定条件について、その同期加算方法を理論的に考察した上で、測定における信号周期、回転周期、角度ステップ数等が乱反射率に及ぼす影響を縮尺及び実大測定を通して検討した。Step 法では、信号の種類に関わらず、角度ステップ数の下限値が存在し、その値は試料の乱反射率が高いほど、部屋の吸音面積が小さいほど、増加することがわかった。SS 信号による連続法では、1 回転での信号数の下限値が存在し、それは Step 法の角度ステップ数に対応することを示した。MLS 信号による連続法では、部屋の残響時間に比例する回転周期の下限値が存在し、その値は試料の乱反射率が高いほど、部屋の吸音面積が小さいほど、増加するものの、インパルス応答の切り出し時間に大きく依存することを確認した。ISO 規定の角度ステップ数 60~120 個は普通の残響室、高い乱反射率の試料に対して、乱反射率の過小評価をもたらす可能性があり、連続法で用いる測定信号については、SS 信号の方が MLS 信号より実用的であることを示した。

第 3 章では、前章で構築したランダム入射乱反射率の測定システムを用いて各種壁面拡散体の乱反射率特性を調べた。特に、一般的な拡散壁であるリブ及びブロック構造を対象とし、縮尺模型測定によるケーススタディを通して表面形状に起因する乱反射率の特徴を明らかにし、拡散壁設計上で有用な知見を得た。

リブ構造壁面について、角柱高さ、角柱配置、背後空気層、角柱形状、吸音仕上げによる乱反射率特性を調べた。角柱リブ構造の乱反射率は、角柱高さが半波長付近の周波数で低下し、そのディップは高さの増加に伴い低音域に移動することがわかった。リブの高さ変動、間隔の拡大・不均等化、背後空気層の挿入は上記ディップを緩和し、周波数特性の平坦化に有効であることを示した。また、円柱・直立板リブ構造の乱反射率は、角柱リブ構造に概ね近似しつつ、高音域に向けて緩やかに増加する傾向が見られた。リブ構造の溝部または背後に吸音材を挿入した場合は、吸音材無しの場合と比較的類似した乱反射率特性を示した。

その後、ブロック構造壁面について、被覆率や配列による乱反射率特性を調べた。立方体ブロック構造の乱反射率は、低中音域で小さく、高音域のみで大きくなる傾向が見られた。被覆率は 25~50 % で高音域の乱反射率は同程度であり、それ以上の被覆率では低下する傾向にある。またブロック被覆率 50 % では、ブロックの交互配置よりランダム配置の方が中音域で乱反射率が增大し、同被覆率の角柱リブ構造の周波数特性に近づくことを示した。

第 4 章では、第 2 章の測定法とは全く異なる原理の垂直入射乱反射率の測定法を考案し、縮尺模型測定を通して試料の適用条件や測定における誤差要因等に関する検討を行い、数値解析結果との比較により測定法の汎用性及び有効性を検証した。

はじめに新たに提案する垂直入射乱反射率の測定理論について述べ、矩形室において 1 次元音場が卓越する条件を設定し、試料設置による残響時間の変化から垂直入射乱反射率を求める測定方法を提案した。

次に、縮尺模型測定により実現し、試料の適用条件や測定における設定条件等の適切な測定条件を導いた。受音点位置に関しては、受音点毎のエネルギーレベル差は見られるものの、周波数によらず減衰率は概ね一致することを示した。試料設置方向による影響は小さいことを示した。また、乱反射率の周波数特性が異なる様々な試料を対象とした検討を行った。乱反射率は残響時間の同定区間により大きく変化するものの、初期に対し後期の残響曲線から同定した測定値は計算値と非常に良く対応することを確認した。

最後に、以上の測定法の応用的な利用法として、縮尺模型実験により 2 次元ランダム入射乱反射率の同定を試み、数値解析結果との比較を通して、測定法の適用可能性に関する検討を行った。入射角依存性を考慮した測定法であるため試料方向により測定値が異なることが例示されたが、測定法として精度上の問題が大きいことがわかった。

第 5 章では、乱反射率の波動音響解析手法を用いて、典型的な拡散壁面仕上げである周期構造壁面の乱反射率特性を調べると共に、測定結果との比較検証を行い測定法の汎用性及び適用性を向上させた。さらに、その応用として音響設計上有効な拡散体を提案した。

はじめに 3 次元音場における反射指向特性から乱反射率を算出する方法について述べ、境界要素法を適用した乱反射率の数値計算方法について概説した。

次に正弦波、三角波、矩形波となる 3 種類の 1 次元周期構造壁面を対象として取り上げ、その凹凸形状、高さ、幅による影響を具体的に検討した。全体的に、矩形波型壁は高音域において顕著なピーク・ディップが生じるのに対して、正弦波型壁・三角波型壁は比較的穏やかな周波数特性を有するため、拡散壁としての性能としてはより優れているものと考えられる。周期構造壁面の拡散性能を最大化するための凹凸高さは、ランダム入射時においては、正弦波型壁で周期に比べ 30 % 程度、三角波型壁で 40 % 程度、矩形波型壁で 20 % 程度の高さとし、垂直入射時においては、正弦波型壁、三角波型壁及び矩形波型壁でそれぞれ 20, 25, 15 % 程度の高さに設定することが望ましいことが確認された。凹凸幅に関しては、高さによらずランダム及び垂直入射時と共に周期に比べ 50 % の幅で拡散効果が最大になることを示した。

最後に、周期構造壁面の汎用的な利用法として、建築空間において多く用いられている矩形波型壁を対象とし、音場の拡散性の向上やフラッターエコー等の音響障害を緩和するための拡散体の設定方法を提案した。第 6 章では、以上の研究成果を総括し、今後の課題について述べた。

本研究により、測定・数値解析の両面で壁面音響乱反射率の定量化手法が整備されることで、将来的には、各種壁面の乱反射率データベースが構築され、それを基礎データとした幾何音響シミュレーションの精度向上や室内音響設計・拡散体設計における指針の確立が期待される。